

Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Engenharia Mecânica

**CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO DE
ESTRUTURAS RESISTENTES AO
IMPACTO COM BASE NA
BIOMIMÉTICA – OBSERVAÇÃO E
REEXPLORAÇÃO DA NATUREZA.**



Luiz Carlos Felisberto

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

ORIENTADOR: Prof. Titular Rosalvo Tiago Ruffino.

São Carlos

1999

Class.	TESE-EESC
Cott.	2086
Tombo	010 00

31100008562

sys 1071583

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

F315c Felisberto, Luiz Carlos
Contribuição para o estudo de estruturas
resistentes ao impacto com base na biomimética :
observação e reexploração da natureza / Luiz Carlos
Felisberto. -- São Carlos, 1999.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São
Carlos-Universidade de São Paulo, 1999.

Área: Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Tit. Rosalvo Tiago Ruffino.

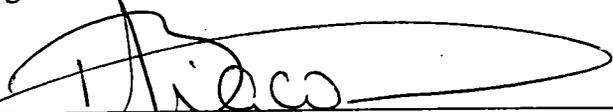
1. Impacto. 2. Choque. 3. Biônica. 4. Biomimética.
I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **LUIZ CARLOS FELISBERTO**

Tese defendida e aprovada em 17.12.1999
pela Comissão Julgadora:

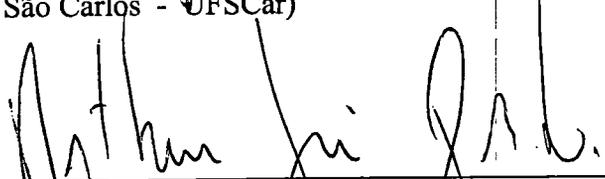

Prof. Titular **ROSALVO TIAGO RUFFINO (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)


Prof. Doutor **BENEDITO DI GIACOMO**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)


Prof. Titular **DIRCEU SPINELLI**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)


Prof. Titular **GILBERTO ORIVALDO CHIERICE**
(Instituto de Química de São Carlos - Universidade de São Paulo)


Prof. Doutor **JOSÉ ANGELO GREGOLIN**
(Universidade Federal de São Carlos - UFSCar)


Prof. Associado **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO**
Coordenador da Área de Engenharia Mecânica


JOSÉ CARLOS A CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

DEDICATÓRIA

À

minha mãe

Wladyslawa Jaremczuk Felisberto

(in memoriam)

Nada atrai menos a atenção do que o sucesso total.

(GORDON, 1968 apud JERONIMIDIS, 1995).

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Titular Rosalvo Tiago Ruffino pela orientação, apoio técnico e material e incentivo para a execução deste trabalho,

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da EESC-USP por conceder a oportunidade e os meios para o desenvolver este trabalho,

Ao Departamento de Desenho Industrial da Unesp, campus de Bauru, pelo afastamento parcial concedido de dois dias por semana, sem desligamento das atividades administrativas, acadêmicas e didáticas,

À CAPES – Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela bolsa parcial concedida através do PICD – Programa Institucional de Capacitação Docente.

Ao Prof. Dr. Benedito Di Giacomo por ceder as instalações e os equipamentos do Laboratório de Metrologia do Departamento de Engenharia Mecânica da EESC-USP,

Ao Prof. Titular Gilberto Orivaldo Chierice, chefe do Grupo de Química Analítica e Tecnologia de Polímeros (GQATP) do Instituto de Química da USP de São Carlos por ceder as instalações e matérias primas do Grupo para a confecção dos modelos em Poliuretano derivado de óleo de mamona, bem como do verniz frágil.

Ao Prof. Dr. Benedito de Moraes Purquério, pela sugestão de construção de modelos em resina de PU derivada de óleo de mamona.

-
- Ao Prof. Dr. Jonas de Carvalho e ao Prof. Dr. João Lirani, por ceder as instalações, equipamentos computacionais e programas (especialmente o ANSYS) do Laboratório de CAD/CAE para a construção dos modelos pelo método dos elementos finitos.
- Ao Prof. Dr. Jonas de Carvalho e ao mestrando Rodrigo M. Godoy, do Núcleo de Prototipagem Rápida da Fundação Parque de Alta Tecnologia de São Carlos (ParqTec) pela execução dos modelos geométricos utilizando a máquina de prototipagem rápida por FDM da Stratasys Inc..
- Ao Prof Toshiaki Takeya por ceder as instalações e os equipamentos do Laboratório de Ensaios do Departamento de Estruturas da EESC – USP para a realização dos ensaios dinâmicos de impacto e estáticos,
- Prof. Dr. Edson Siqueira da área de Ovinocultura da Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia do Instituto de Biociências do campus da Unesp de Botucatu, e à Mestre Simone pelas imagens e fornecimento das cabeças de carneiro
- Ao Prof. Dr. Jofre Guazzelli Filho e aos funcionários do Departamento de Anatomia do Instituto de Biociências do campus de Botucatu da Unesp, pelo tratamento de masceração e limpeza das cabeças de carneiro
- Aos colegas do Departamento de Desenho Industrial da Unesp, campus de Bauru, pelas discussões e estímulo.
- Aos integrantes do Laboratório de Metrologia pela ajuda nas medições dos crânios, especialmente ao Alessandro Marques, ao Cláudio T. Gonçalves e ao Luis.
- Ao Dr. Salvador Claro Neto, ao Dr. Luís Carlos (Testão) e ao funcionário Antônio (Toninho) do Grupo de Química Analítica e Tecnologia de Polímeros (GQATP) do Instituto de Química da USP de São Carlos

pelo apoio técnico e material para a confecção dos modelos em resina de PU.

Aos integrantes do Laboratório de CAD/CAE do Departamento de Engenharia Mecânica da EESC – USP, pela ajuda na construção dos modelos do crânio utilizando o método dos elementos finitos, especialmente aos mestrandos Geraldo, Mariano E. Moreno e Alexandre Hubinger e aos doutorandos Neilor C. dos Santos e Volnei Tita,

Aos integrantes do Laboratório de Ensaios do Departamento de Estruturas da EESC - USP pela ajuda na construção do banco de ensaios e na execução dos testes de impacto, especialmente ao Dr. Luis Vicente Vareda, ao técnico Amauri Inácio da Silva, ao funcionário Mario e aos estagiários,

Às bibliotecárias da EESC - USP, especialmente à Eleninha e à Elenice

Às bibliotecárias da UNESP campus de Bauru, especialmente à Edisa, Marisi e Maristela.

Às (os) funcionárias (os) da Secretaria Geral de Pós Graduação, especialmente à Nazareth, Andreia, Silvia e Élcio.

Aos integrantes da oficina do Laboratório de Máquinas Ferramenta do Departamento de Engenharia Mecânica da EESC – USP, especialmente ao Sr. Adão e ao José Carlos, pela ajuda no reparo do banco de ensaios, bem como no manuseio dos modelos,

Ao Dr. Renato Goulart Jascinevicius pelas discussões e estímulo bem como pela ajuda na redação do Abstract.

Aos funcionários do Departamento de Desenho Industrial da Unesp, campus de Bauru,

Ao Mestre Fabrício Flores pelo uso da placa de aquisição de dados da Máquina de Medir do Laboratório de Metrologia.

Ao Mestre Amauri Bravo Feneda pelo uso do programa para a conversão de arquivos .DAT em .IGS.

Ao Renato Motta Filho do CETEPE pela edição e captura das imagens das fitas de vídeo

Ao aluno de graduação em Engenharia de Produção Mecânica, Flavio do Couto Almeida pela ajuda na execução dos testes de impacto, bem como nas discussão dos resultados.

À firma UENO'S Extintores de São Carlos por doar a carcaça de extintor usada na construção do banco de ensaios.

Aos funcionários de Departamento de Engenharia Mecânica da EESC-USP,

Às funcionárias da secretaria de pós graduação do Departamento de Engenharia Mecânica, Ana Paula e Beth.

Ao Prof. Dr. Luiz Matin Gonçalves pelas discussões e sugestões,

Ao Adão do setor de publicações da EESC-USP pela atenção e pelas encadernações,

À todas as demais pessoas que colaboraram na execução deste trabalho e

À Natureza.

**Contribuição para o Estudo de Estruturas Resistentes ao Impacto
com Base na Biomimética – Observação e Reexploração da
Natureza.**

SUMÁRIO

	Página
Dedicatória	iv
Agradecimentos	vi
Sumário	x
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xxii
Resumo	xiv
Abstract	xv
Objetivos	xvi
1 – INTRODUÇÃO.....	1
2 – BIOMIMÉTICA E BIÔNICA.....	4
2.1 – Biomimética e Biônica – Definições e Histórico.....	4
2.2 – Termo Empregado Neste Trabalho.....	8
2.3 - O Procedimento.....	9
2.4 – Classificação dos Sistemas Videntes.....	13
2.5 – Aplicações da Biônica e da Biomimética.....	14
2.6 – Pesquisa na Internet.....	34
2.7 – Considerações Finais.....	34

3 – DEFINIÇÃO DO CAMPO DE TRABALHO.	36
3.1 – Busca de uma Aplicação da Biomimética / Biônica em Máquinas Ferramenta.	37
3.1.1 – Definição do Estudo de Estruturas Resistentes ao Impacto e Hipótese de Trabalho.	40
3.2 - Busca de Estruturas Naturais Resistentes ao Impacto.	41
3.2.1 - A Hipótese.	42
4 – LEVANTAMENTOS DE DADOS.	44
4.1 – Levantamento de Campo para Obter Exemplares de Crânios.	44
4.2 – Material Obtido.	45
4.2.1 – Crânios.	45
4.2.2 – Filmagem em Vídeo.	48
4.3 – Determinação das Condições do Impacto.	50
4.3.1 – Tipo do impacto, ponto de impacto, direção e sentido da força e características da região impactada.	50
4.3.2 – Quantidade de movimento, duração do impacto, impulso e intensidade das forças média e máxima.	53
5 – DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DA GEOMETRIA ESPACIAL DE PARTE DO CRÂNIO ATRAVÉS DE ENSAIOS DE IMPACTO E DAS TENSÕES QUE NELE OCORREM EM SIMULAÇÕES ESTÁTICAS VIRTUAIS.	66
5.1 – Construção do Banco e da Base de Ensaio.	66
5.2 – Ensaio Com Crânios Naturais.	78
5.3 – Ensaio com Modelos de Parte do Crânio em Resina de Poliuretano à Base de Óleo de Mamona.	87
5.4 – Modelamento pelo Método dos Elementos Finitos.	110

6 – PRINCÍPIOS SUGERIDOS PELA NATUREZA EM FACE DE UM IMPACTO.	138
6.1 – Princípios Sugeridos pela Região Central do Crânio	140
6.2 – Princípios Sugeridos pela Região Frontal do Crânio.	145
6.2.1 - Determinação de um Perfil Leve e Resistente.	145
6.2.2 – Construção de Modelos Plásticos Utilizando Prototipagem Rápida.	147
6.2.3 – Confeção de um Molde em Borracha de Silicone e de Corpos de Prova em Resina de Poliuretano à Base de Óleo de Mamona.	151
6.2.4 – Ensaio de Impacto com Modelos Geométricos.	155
6.2.5 – Modelamento das Geometrias Regulares pelo Método dos Elementos Finitos.	159
6.2.6 – Discussão dos Resultados.	161
7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.	171
7.1 – Considerações sobre a Resistência das Geometrias Testadas ao Impacto no Banco de Ensaio.	171
7.2 – Considerações Sobre as Tensões que Ocorrem nos Sólidos Modelados.	171
7.3 – Sugestões para Trabalhos Envolvendo Uniões entre Componentes ou Partes de uma Estrutura.	173
7.4 – Sugestões para Trabalhos Envolvendo Geometrias Espaciais que devam Resistir a Impactos.	173
7.5 – Sugestões para Aplicação de Resultados.	174
ANEXOS.	177
BIBLIOGRAFIA.	198

LISTA DE FIGURAS

	Página
Capítulo 2: Figuras	
2.1 – Projetos de Leonardo da Vinci.	20
2.2 – Modelos de perfis de cascos de navios reproduzidos à partir de projetos de Leonardo da Vinci.	21
2.3 – (a) Folha da Vitória Régia vista por baixo e (b) Ilustração da estufa (<i>greenhouse</i>) do <i>Chatsworth Park</i>	21
2.4 – L’Eole – máquina voadora de Clément Ader	22
2.5 – (a) Estruturas arboriformes de Frei Otto e (b) Aeroporto de Stuttgart	23
2.6 – (a) Um pato (<i>canard</i>) e (b) O 14bis em fase de testes acoplado ao balão 14	23
2.7 – Semelhança entre uma libélula e o <i>Demoiselle</i>	24
2.8 – Evolução do <i>Demoiselle</i> para os atuais ultra leves	25
2.9 – Torre de tiro para tanques de guerra projetadas conforme a concha externa e interna do mexilhão.	26
2.10 – Cabeçote hexápode modelo CMW 300, produzido pela empresa CMW (França).	27
2.11 – Braços robóticos baseados na tromba do elefante e na coluna vertebral de peixes.	28
2.12 – (a) semente alada do Bordo e (b) Hélice	29
2.13 – (a) Pata de lagartixa e (b) solado de calçado para alpinistas	29
2.14 – (a) Fruto do Cardo e (b) esquema de funcionamento do Velcro	30
2.15 – Embalagem para longa conservação.	30
2.16 – Estrela do mar e roda de liga leve – estética e rigidez.	31
2.17 – (a) Tatu, (b) Divisão do capacete em placas; (c) Corte mostrando as partes internas do capacete e (d) Protótipo do capacete.	31
2.18 – Proposta de material composto com base na estrutura interna da madeira	32

2.19 – (a) Estrutura do tendão com escala. (b) Ilustração de um cabo de aço, sem escala.	33
---	----

Capítulo 3: Figuras

3.1 – Modelo em madeira na escala 1:5 da fresadora desenvolvida por FELISBERTO (1994), juntamente com um modelo humano masculino na mesma escala para o percentil 50% da população.	37
3.2 – Árvore da espécie <i>Eucalyptus sp</i> localizada na região de São Carlos .	38
3.3 – Lado esquerdo: fotografia da união de um galho de árvore com o tronco. Lado direito: sobreposição das curvas naturais (___) e as curvas de Baud (----)	39

Capítulo 4: Figuras

4.1 – Crânio 1: vista de perfil.	45
4.2 – Crânio 1: vista frontal.	45
4.3 – Crânio 1: vista posterior.	46
4.4 – Crânio 1: vista de perfil com as vértebras cervicais acopladas.	46
4.5 – Crânio 1: vista com as vértebras cervicais não acopladas.	46
4.6 – Crânio 2: vista de perfil.	47
4.7 – Crânio 2: vista posterior.	47
4.8 – Crânio 3: vista em perspectiva.	47
4.9 – Sequência mostrando parte das filmagens.	49
4.10 – Ponto de Impacto durante a luta.	51
4.11 – Representação esquemática através dos esqueletos, da posição dos corpos dos carneiros e do ponto de impacto.	52
4.12 – Ilustração do crânio de um carneiro. A seta aponta para o osso parietal mostrando a região do impacto e a provável direção da força de impacto.	53
4.13 – Corte longitudinal do crânio de um carneiro.	54
4.14 – Corte transversal D-D da cabeça de um carneiro em uma região anterior à que sofre o impacto.	54

4.15 – Força exercida por um corpo sobre outro durante uma colisão em função do tempo.	56
4.16 – A força média num intervalo de tempo é a força constante que imprime o mesmo impulso que a força real, no mesmo intervalo. . . .	56
4.17 – Pesagem do carneiro da raça Romney Marsh.	58
4.18 – Pesagem do carneiro da raça Bergamácia.	58
4.19 - Dimensões da gaiola para pesagem.	59
4.20 – Esquema com as dimensões do carneiro da raça Bergamácia.	60
4.21 – a) Determinação da distância entre os animais. e b) Determinação do intervalo de tempo.	60
4.22 – Montagem para a captura dos sons do impacto.	63
4.23 – Ondas sonoras gravadas.	63
4.24 – Curva Fxt do impacto à partir das ondas sonoras.	64

Capítulo 5: Figuras

5.1 – Esquema do Banco de Ensaios à ser construído.	67
5.2 – Suporte do tubo de PVC.	70
5.3 – Cilindro de extintor de incêndio adaptado para uso como massa de queda livre.	70
5.4 – Montagem do suporte da roldana do banco de ensaios para impactos no prédio da ponte rolante do Departamento de Estruturas da EESC - USP.	72
5.5 – Suportes inferiores do banco de ensaios.	73
5.6 – Banco de ensaios montado.	56
5.7 – Parte superior da base.	74
5.8 – Parte inferior da base.	75
5.9 – Vista completa da primeira tentativa de montagem da base de apoio .	75
5.10 – Deformação lateral da parte superior da primeira tentativa de montagem da base.	76
5.11 – Segunda tentativa de montagem da base, sem o pneu amortecedor. .	76
5.12 – Segunda tentativa de montagem da base, com o pneu amortecedor. .	77

5.13 – Corpo de prova A1 (crânio) e sua respectiva base de apoio de madeira.	77
5.14 – Corpos de prova A1, A2 e A3 colados com massa epóxi em suas respectivas bases de apoio de madeira.	78
5.15 – Ensaio estático não destrutivo- corpo de prova A3, fase 1.	79
5.16 - Ensaio estático não destrutivo – corpo de prova A3, fase 2.	80
5.17 – Posicionamento por meio de parafusos dos corpos de prova do tipo A na base amortecida.	82
5.18 – Marcações de centro na base do cilindro para posicionamento visual do conjunto base e corpos de prova.	82
5.19 – Deformação da base do cilindro de extintor de incêndio.	83
5.20 – Reforço de uma placa de aço de 6,4mm soldada na base do cilindro.	84
5.21 – Estado do corpo de prova A2 após ensaio de impacto destrutivo. . .	86
5.22 – Linhas de ruptura do corpo de prova A1 após ensaio de impacto destrutivo.	86
5.23 – Gráficos da resistência à tração e à compressão da resina de poliuretano derivada de óleo de mamona em função da carga de CaCO_3	90
5.24 – Corte executado no corpo de prova A3.	92
5.25 - Caixa de Duratex® com uma superfície melamínica calafetada e com a matriz óssea posicionada.	94
5.26 – Caixa com a matriz posicionada e a última camada de enchimento. .	94
5.27 – Parte macho do molde de silicone ainda na caixa após a cura.	96
5.28 – Molde de parte do crânio. Metades macho, fêmea e postiço.	96
5.29 – Matriz óssea sem a parede frontal dos Sinus.	97
5.30 – Preparação da resina à base de óleo de mamona para a confecção de corpos de prova. Adição do Polioli.	99
5.31 – Preparação da resina à base de óleo de mamona para a confecção de corpos de prova. Adição de Pré-polímero.	99
5.32 – Preparação da resina à base de óleo de mamona para a confecção de corpos de prova. Adição de Carbonato de Cálcio.	100

5.33 – Preparação da resina à base de óleo de mamona para a confecção de corpos de prova. Deaeração.	101
5.34 – Preparação do corpo de prova em resina à base de óleo de mamona Colocação da resina na parte fêmea do molde de silicone.	101
5.35 – Preparação do corpo de prova em a resina à base de óleo de mamona.	102
5.36 – Corpo de prova do tipo B antes e depois da colagem em placa de Duratex®.	103
5.37 – Corpo de prova do tipo C antes e depois da colagem em placa de Duratex®.	103
5.38 – Furação do corpo de prova do tipo B para simulação dos Sinus Frontais.	104
5.39 – Total de corpos de prova do tipo B (acima) e C (abaixo) produzidos.	104
5.40 – Ruptura de um corpo de prova do tipo B na forma de estrela devido a um impacto experimental com um martelo.	105
5.41 – Nova base.	106
5.42 – Corpos de prova posicionados no banco de ensaios.	107
5.43 – Aspecto dos corpos de prova após ensaio de impacto.	108
5.44 – Digitalização da superfície externa do crânios 3 utilizando a MM3C.	113
5.45 – Nuvem de pontos obtida com a digitalização da superfície externa do crânio 3.	114
5.46 – Digitalização da superfície interna do crânio do carneiro 3.	115
5.47 - Nuvem de pontos obtida com a digitalização da superfície interna do crânio 3.	116
5.48 – Paquímetro usado na medição da espessura do crânio.	116
5.49 – Nuvens de pontos das digitalizações externa e interna posicionadas.	117
5.50 – <i>Splines</i> traçadas pelos pontos digitalizados.	118
5.51 – Marcação das linhas de referência longitudinais para o corte de fatiamento.	119

5.52 – Corte em serra de fita das fatias longitudinais.	120
5.53 – Fatias longitudinais numeradas de 1 a 12.	121
5.54 – Fatia longitudinal 4 escaneada e importada para o AutoCad®.	122
5.55 – Perfis geométricos longitudinais montados.	122
5.56 – Plotagem de uma das tentativas de geração de elementos.	123
5.57 – Fatias transversais numeradas de 1 a 23.	125
5.58 – Fatia transversal 9 escaneada e importada para o AutoCad®.	126
5.59 – Perfis geométricos transversais montados para a posterior modelagem.	126
5.60 – (a) localização da fatia 5 no volume total, (b) malha frontal da fatia 5, (c) malha posterior da fatia 5.	127
5.61 – Pré malha mostrada através de linhas pela qual será modelada, por meio de elementos finitos.	128
5.62 – Malha de elementos hexaédricos gerada com a opção SOLID 95 do ANSYS®.	131
5.63 – Condições de contorno impostas no modelo.	132
5.64 - Contorno da distribuição de tensões na direção X na superfície externa.	134
5.65 - Contorno da distribuição de tensões na direção X para a superfície interna.	134
5.66 - Contorno da distribuição de tensões na direção Y na superfície externa.	135
5.67 - Contorno da distribuição de tensões na direção Y para a superfície interna.	135
5.68 - Contorno da distribuição de tensões na direção Z na superfície externa.	136
5.69 - Contorno da distribuição de tensões na direção Z para a superfície interna.	136
5.70 - Contorno da distribuição de tensões de von Mises na superfície externa.	137

5.71 - Contorno da distribuição de tensões de von Mises na superfície interna.	137
---	-----

Capítulo 6: Figuras

6.1 – Foto do crânio em perspectiva mostrando as regiões A, B e C.	138
6.2 – Perfil da parte frontal da fatia 4 do modelo em resina.	139
6.3 – Estrutura geral de uma sutura.	140
6.4 – Vista superior (em planta) das suturas serrata observadas no crânio do carneiro.	143
6.5 – Proposta de aplicação: Calota esférica montada à partir de 3 peças. ...	145
6.6 – Perfil utilizado na geração das superfícies de revolução e extrusão. ...	146
6.7 – Esquema de uma construção utilizando pilares de escora.	146
6.8 – Sólido geométrico tridimensional gerado à partir da rotação do perfil.	147
6.9 - Sólido geométrico tridimensional gerado à partir do espelhamento e extrusão do perfil.	148
6.10 – Máquina de prototipagem rápida.	148
6.11 – Fatiamento do modelo da s 6.8.	149
6.12 – Exemplo de um caminho gerado pelo programa para uma fatia do meio do modelo da 6.8.	150
6.13 – Fatiamento do modelo da 6.9.	150
6.14 – Exemplo de um caminho gerado pelo programa para uma fatia do meio do modelo da 6.9.	150
6.15 – Peças sólidas de revolução (esquerda) e de extrusão (direita) obtidas por FDM.	151
6.16 – Fase intermediária da preparação da caixa para a confecção da parte macho do molde em silicone.	152
6.17 – Fase final da preparação da caixa para a confecção da parte macho do molde em silicone.	152
6.18 – Molde pronto.	152
6.19 – À esquerda a parte macho do molde e sobre ela o vazador de cobre.	153

6.20 – Corpos de prova do tipo E. Corte das abas.	154
6.21 – Corpos de prova do tipo E. Torneamento e lixamento.	155
6.22 – Corpos de prova do tipo D (acima) e do Tipo E (abaixo)	155
6.23 – Corpos de prova posicionados no banco de ensaios.	156
6.24 – Aspecto dos corpos de prova após ensaio de impacto.	157
6.25 – Modelo axisimétrico D.	160
6.26 - Modelo axisimétrico E.	160
6.27 - Modelo axisimétrico E regular.	160
6.28 – Contorno da distribuição de tensões nodais na direção X para o modelo D.	162
6.29 – Contorno da distribuição de tensões nodais na direção Y para o modelo D.	162
6.30 – Contorno da distribuição de tensões nodais na direção Z para o modelo D.	163
6.31 – Contorno da distribuição de tensões nodais de von Mises para o modelo D.	163
6.32 – Contorno da distribuição de deslocamentos na direção X para o modelo D.	164
6.33 – Contorno da distribuição de deslocamentos na direção Y para o modelo D.	164
6.34 – Contorno da distribuição de tensões nodais na direção X para o modelo E.	165
6.35 – Contorno da distribuição de tensões nodais na direção Y para o modelo E.	165
6.36 – Contorno da distribuição de tensões nodais na direção Z para o modelo E.	166
6.37 – Contorno da distribuição de tensões nodais de von Mises para o modelo E.	166
6.38 – Contorno da distribuição de deslocamentos na direção X para o modelo E.	167

6.39 – Contorno da distribuição de deslocamentos na direção Y para o modelo E.	167
6.40 – Contorno da distribuição de tensões nodais na direção X para o modelo E regular.	168
6.41 – Contorno da distribuição de tensões nodais na direção Y para o modelo E regular.	168
6.42 – Contorno da distribuição de tensões nodais na direção Z para o modelo E regular.	169
6.43 – Contorno da distribuição de tensões nodais de von Mises para o modelo E regular.	169
6.44 – Contorno da distribuição de deslocamentos na direção X para o modelo E regular.	170
6.45 – Contorno da distribuição de deslocamentos na direção Y para o modelo E regular.	170

Capítulo 7: Figuras

7.1 – Osso temporal esquerdo humano.	173
7.2 – Calota geométrica gerada no Capítulo 6 com nervuras no sentido radial ligando as abas com a calota interna.	174
7.3 – Automóvel visto de cima com sugestão de aplicação da geometria proposta.	175
7.4 – Sistema de proteção para caminhões sem freio em um declive.	175
7.5 – Proposta de aplicação do perfil em para choques.	176
7.6 – Proposta para montagem de um módulo dos sólidos de revolução propostos de modo a forma uma placa.	176

LISTA DE TABELAS

	Página
Capítulo 2: Tabelas	
2.I – Localização da Biônica / Biomimética entre outras ciências e atividades.	8
2.IIa – Classificação dos seres vivos com interesse para a Biônica / Biomimética Segundo o ambiente operacional principal.	15
2.IIb – Classificação dos seres vivos com interesse para a Biônica / Biomimética segundo o ambiente operacional principal.	16
2.IIIa – Classificação dos seres vivos de interesse para a Biônica / Biomimética segundo a função desempenhada.	17
2.IIIb – Classificação dos seres vivos de interesse para a Biônica / Biomimética segundo a função desempenhada.	18
2.IIIc – Classificação dos seres vivos de interesse para a Biônica / Biomimética segundo a função desempenhada.	19
Capítulo 5: Tabelas	
5.I – Sumarização dos testes realizados com o corpo de prova A2.	85
5.II – Sumarização dos testes realizados com o corpo de prova A1.	85
5.III – Quadro comparativo das propriedades mecânicas do Poliuretano derivado de óleo de mamona com 30% de CaCO ₃ , Osso trabecular de carneiro e Osso cortical humano.	91
5.IV – Massas de compostos da resina utilizados para confeccionar os corpos de prova.	103
5.V – Sumarização dos testes realizados com os corpos de prova do tipo B.	107
5.VI – Sumarização dos testes realizados com os corpos de prova do tipo C.	108

Capítulo 6: Tabelas

6.I – Massas de compostos da resina utilizados para confeccionar os corpos de prova do tipo D.	153
6.II – Sumarização dos ensaios realizados com os corpos de prova do tipo D.	156
6.III – Sumarização dos ensaios realizados com os corpos de prova do tipo E.	157

Capítulo 7: Tabela

7.I – Sumarização dos dados obtidos com os ensaios de impacto.	172
---	-----

RESUMO

A Biônica / Biomimética tem por objetivo reproduzir formas, princípios e funções da natureza com a tecnologia disponível nas áreas de engenharia, ciência dos materiais e química. Das estruturas naturais envolvidas com impactos, foi escolhido para este estudo o crânio do carneiro da espécie *Ovis aries*, que utilizam a cabeça, sem chifres, como arma de ataque e defesa. Foi estudada a parte superior desses crânios na região de junção dos ossos parietal e frontais. Foram feitos ensaios de impacto em exemplares naturais e em modelos construídos com resina de poliuretano à base de óleo de mamona. Também foi executado o modelamento dessa estrutura pelo método dos elementos finitos. Os resultados mostram qualitativamente e quantitativamente a resistência dinâmica e estática dessa estrutura, as regiões mais tensionadas e a influência dos Sinus Frontais. Foi notado que as junções (suturas) amortecem e distribuem o carregamento e que a forma geométrica de algumas partes do crânio têm desempenho superior. Com base nesses resultados foi proposta uma estrutura geométrica tridimensional e a mesma foi estudada através do ensaios de impacto com modelos em resina e através de simulações com carga estática utilizando modelos gerados por elementos finitos. Os resultados demonstram que a estrutura proposta tem desempenho melhor que uma estrutura esferoidal quanto aos valores e à distribuição de tensões e que a aba de reforço proposta melhora seu desempenho. Por fim foram apresentadas propostas de aplicação prática dos resultados obtidos com várias disposições da geometria proposta que melhoram o comportamento de estruturas ao impacto.

ABSTRACT

Bionics / Biomimetics aims at reproducing forms, principles and functions of the nature with the available technology in the engineering areas and materials and chemistry sciences. In this study, the cranium of the sheep (*Ovis aries*) was chosen, among natural structures involved with impacts, to investigate the behaviours of this structure when undergo to impact. This specie uses the head, without horns, as na attack and defense weapon. The superior part of the cranium in the vicinity of the area of junction of the bones parietal and front was investigated. Impact tests in natural copies and in models built with polyurethane resin made with castor oil were carried out. Finite elements method was used in order to model the structure studied. The results show qualitatively and quantitatively the dynamic and static resistance of the structure as well the stressed areas and the influence of the Front Sinus. It was noticed that the junctions (sutures) can cushion and distribute the loads. In addition the geometric form of some parts of the cranium has presented better results in terms of performance. A three-dimensional geometric structure was proposed and studied based upon the impact tests results carried out with resin models. Simulations with static load using models generated by finite elements were performed. The results show that the proposed structure has presented better performance than a sferoidal structure with relationship to the values and the distribution of tensions and that the brim of reinforcement proposal improves its performance. They were finally presented proposed of practical application of the results obtained with several dispositions of the geometry proposal that improve the behavior of structures to the impact.

OBJETIVOS

O processo de imitação da natureza é tão antigo quanto a própria origem da espécie humana. Sua sistematização é relativamente recente, sendo as primeiras tentativas atribuídas a Leonardo da Vinci (SANTOS, 1987) e recentemente, de aproximadamente 30 anos até hoje, a disciplina Biomimética, sub parte da Cibernética, vem sendo estudada mais intensamente (JACKER, 1970 e RAMOS, 1993).

O presente trabalho visa buscar na natureza princípios, formas e configurações de estruturas resistentes ao impacto e a partir de sua compreensão, buscar meios de reproduzi-las com os materiais e tecnologias disponíveis. O objetivo é o de tentar melhorar o desempenho de peças e produtos que devam resistir a impactos. Especificamente, pretende-se, a partir do estudo do crânio de ovinos da espécie *Ovis aries* (vulgarmente conhecidos por carneiros), conseguir subsídios para a melhorar o desempenho dessas estruturas.

Pretende-se executar este estudo levantando as variáveis físicas e geométricas envolvidas no impacto entre ovinos machos adultos, testando corpos de prova naturais em osso e corpos de prova construídos em resina e através do modelamento da geometria e das condições do impacto utilizando o Método dos Elementos Finitos; executar simulações de carregamentos em modelos de estruturas naturais e propostas.

Desse modo, espera-se contribuir para a metodologia dessa ciência emergente, cujos resultados no início de cada estudo são pouco previsíveis. Ora os estudos e resultados têm características de ciência básica, ora de ciência aplicada, dependendo da abordagem utilizada do preparo dos pesquisadores e da tecnologia disponível.

1 – INTRODUÇÃO.

Estamos numa era que sob a perspectiva do século XXII, supõe-se, se assemelhará, em termos tecnológicos, à perspectiva que temos hoje ao olharmos os acontecimentos do século XV quando a caravela, o astrolábio e as cartas marítimas dos portugueses se enquadravam no estado da arte do conhecimento humano e eram segredos estratégicos muito bem guardados. (PEREIRA, 1997).

Segundo DAVIS (1991) a próxima era, a quarta, será a da biotecnologia que atualmente está em seu estágio embrionário do mesmo modo que a era da informação com seus programas e computadores, a terceira, o estavam há 50 anos atrás.

Já podemos vislumbrar manifestações desse potencial futuro negócio dado o grande interesse nesse campo, manifestado pelos assim chamados países desenvolvidos pela área biotecnológica e em especial pelos recursos naturais preservados até o momento nos países ditos em desenvolvimento.

Estes futuros negócios já estão se manifestando como por exemplo na área de alimentos, onde cereais e outros seres de interesse comercial estão tendo suas características geneticamente modificadas para uma melhor produtividade e resistência às pragas. (UTOPIA, 1998).

Este raciocínio aliado ao anterior nos leva a crer que fica evidente nosso relativo pouco conhecimento da natureza e dos fenômenos físicos, químicos e biológicos e de quão rapidamente está avançando o conhecimento humano, apesar de ainda estarem insolúveis inúmeros problemas sociais.

Suposições, dentre outras de um navegador e um computador de bordo para automóveis que no início da década de 80 pareciam distantes hoje já são realidade, embora acessíveis a uma minoria.

Suposições sobre a manipulação genética e a criação de novos seres que num passado não muito distante se enquadrava na categoria de ficção científica, atualmente dão seus primeiros passos.

Já se especula para os próximos 50 a 100 anos que o uso da bioengenharia possa acelerar a evolução das espécies de milhões para centenas de anos, permitindo a criação de animais aptos à vida no espaço e que possam servir de pré colonizadores para planetas ou satélites distantes (GNT, 1999).

Suposições sobre a criação artificial de órgãos e de "seres humanos artificiais" (replicantes) como previu Ridley Scott em Blade Runner (WARNER, 1982) estão longe de ser realidade pois o projeto de sistemas biológicos transcende a compreensão humana e estima-se que permaneça assim além do futuro previsível pela nossa imaginação.

É contudo claro que a observação de características notáveis dos exemplos encontrados na natureza possam conduzir a percepções prontamente utilizáveis em sistemas tecnológicos (HAYWARD, 1993).

Existe um princípio da natureza de que quanto maior solicitação, maior é o reforço (MATTHECK, 1995). Nas peças de engenharia atualmente ocorre exatamente o contrário, ou seja, quanto maior a solicitação, maior a deterioração: corrosão, trincas, degradação do plástico e de outros materiais.

O contraste é feito entre o tradicional enfoque da engenharia da extração do máximo benefício de uma escolha de materiais e o enfoque da natureza da extração do máximo benefício de formas estruturais feitas de materiais indiferentes, ou seja, materiais comumente encontrados na natureza em diversos locais ou seres e construídos à partir de substâncias simples e quase que invariavelmente à temperatura ambiente. (JERONIMIDIS, 1995).

A Biomimética é a abstração do bom projeto da natureza. É o processo pelo qual ideias da biologia podem ser aplicadas em disciplinas como engenharia,

ciência dos materiais e química. Embora não seja uma nova abordagem - a natureza sempre inspirou invenções (THOMPSON, 1942) - está sendo percebido por muitos que a Biomimética está se tornando cada vez mais um importante campo e dele se esperam avanços tecnológicos desde que, na luta pela sobrevivência, plantas e animais desenvolveram soluções para os mesmos tipos de problemas que os cientistas e engenheiros enfrentam atualmente. O aumento da eficiência, especialização e otimização são forças comuns tanto na engenharia quanto na biologia. (JERONIMIDIS, 1995).

2 – BIOMIMÉTICA E BIÔNICA.

2.1 – Biomimética e Biônica – Definições e Histórico.

Por serem áreas com sistematização relativamente recente, de aproximadamente 30 – 40 anos até hoje, não existem ainda delimitações precisas das áreas e do modo de atuação da Biônica e da Biomimética.

Ambas são ciências que estudam os sistemas naturais de modo geral e mais especificamente os sistemas vivos ou similares aos sistemas vivos. O objetivo é o de serem obtidos modelos, novas orientações, princípios, técnicas, procedimentos, processos, inspirações e idéias para aprimorar os sistemas técnicos humanos com características análogas. A materialização das mais sofisticadas funções desempenhadas pelos sistemas naturais se dá utilizando a tecnologia disponível nas áreas de materiais, de processos de fabricação e outras áreas necessárias. (adaptado de BIOMIMETICS, 1999, BONSIPE, 1978, OFFNER, 1974 e BARNES, 1963)

A especificação do campo de atuação de cada uma delas é um assunto controverso e ainda não resolvido.

Segundo uma visão particular obtida através de consultas à livros da área e de pesquisas na rede internacional de computadores (*internet*), enquanto a Biônica está mais voltada para a análise de sistemas naturais sob o ponto de vista macroscópico, principalmente quanto à forma, geometria aparência e princípios naturais de resolução de problemas, a Biomimética tem uma tendência de se

preocupar com a análise dos sistemas naturais sob o ponto de vista microscópico como por exemplo os relacionados com as reações químicas e novos materiais.

Outro aspecto que pode ser notado é que quando se analisam os fenômenos sob o ponto de vista qualitativo denominam-se estes estudos mais frequentemente por Biônica enquanto que os estudos quantitativos são denominados de Biomimética.

Estes pontos de vista não são unânimes nem internacionalmente definidos. Uma melhor definição de áreas de atuação provavelmente virá com o desenvolvimento desta ciência.

Existe uma lista de discussão sobre Biomimética (BIOMIMETICS, 1999) onde recentemente foi colocada a questão da diferença entre Biônica e Biomimética para alguns dos maiores especialistas na área a nível mundial. Não houve sequer uma resposta.

Origens dos Termos e Histórico

Biônica

A Biônica teve uma origem mais antiga e mais difundida, tanto que o número de definições é bastante grande.

Atribui-se a criação do termo Biônica (do original em inglês: "Bionics") à J. E. Steele do U.S. Air Force Aerospace Medical Laboratories (Laboratório Médico - Aeroespacial da Força Aérea dos EUA). Ele foi usado pela primeira vez em 1960 para denominar um simpósio que reuniu cientistas de diversas áreas tais como: biologia, física, matemática, engenharia elétrica, engenharia eletrônica e outras, caracterizando portanto desde o início o caráter interdisciplinar da Biônica.

Neste simpósio foram discutidos assuntos relacionados à tese de que a proposição de idéias obtidas da análise de sistemas biológicos poderiam ser aplicadas no projeto de sistemas artificiais de processamento de informações.

Mais precisamente, os participantes do simpósio tinham interesse na investigação das rotas sensoriais através das quais os animais obtêm e processam informações e a incorporação deste conhecimento em sistemas sintéticos. (BIONICS, 1969).

O termo é derivado da palavra grega *bion* que significa unidade ou organismo vivo. Existe uma concepção errônea derivada das primeiras aplicações práticas obtidas com esta ciência, que associa o termo à união das palavras biologia e eletrônica. (BARNES, 1963).

Definida como um tipo de cibernética aplicada, a Biônica se desenvolveu nos anos 60 como uma estrutura para perseguir o desenvolvimento de sistemas artificiais baseados no estudo de sistemas biológicos.

O objetivo da Biônica, conforme definido por um de seus pioneiros, Henning E. Von Gierke era - estender as capacidades físicas e intelectuais do homem por dispositivos de prótese no sentido mais geral e substituir o homem por máquinas inteligentes e automáticas - Estes objetivos foram perseguidos usando modelos do reino animal.

Por exemplo, a habilidade da coruja de se precipitar tão perfeitamente como ela o faz ou a habilidade dos besouros em criar mapas topográficos do terreno sobre os quais eles voam foram examinadas. Numerosas disciplinas e tecnologias (algumas das quais estão ainda em sua infância), incluindo inteligência artificial e dispositivos de aprendizagem, processamento de informações, arquitetura e controle de sistemas, percepção, mecanismos de sensoriamento, bioenergética e outras áreas biológicas e técnicas contribuem para a pesquisa na biônica. (DARIO, 1993)

Nota-se que desde seus primórdios a Biônica esteve ligada à eletrônica, bem como com a imitação de funções principalmente dos seres humanos, daí a interpretação relacionada com as próteses.

Biomimética

Já o termo Biomimética (em inglês *Biomimetics*) tem origem mais recente e ainda de pouca divulgação. É também um neologismo que sugiu da união das palavras gregas *bios* que significa vida e *mimesis* cujo significado é o de executar uma imitação.

Existem outros termos relacionados com o assunto que são os seguintes:

Biodigmática

Embora seja menos popular, denomina-se esta ciência também por Biodigmática, palavra originária da união da palavras gregas *bios* que significa vida e *deigma* que significa padrão, modelo ou molde. (BARNES, 1967).

Bioengenharia.

Ou Engenharia Biomédica se dedica à construção de aparelhos necessários para pesquisas e diagnóstico médico (RAMOS, 1993).

Biomecânica.

Trabalhando em conjunto com a Bioengenharia, auxilia a construção de próteses com função estrutural e/ou fisiológica para substituir partes danificadas de um organismo (RAMOS, 1993).

Todas estas ciências estão inseridas no estudo da Cibernética que foi uma das primeiras pontes entre biologia e técnica. Norbert Wiener (1894-1963), seu criador, a definia como a ciência do “controle e comunicação no animal e na máquina (WIENER, 1970 apud RAMOS, 1993). A Biônica / Biomimética e a Cibernética são dois aspectos diferentes de um mesmo ramo. Enquanto a cibernética tem por finalidade estudar os sistemas vivos por analogia com os mecânicos, a Biônica / Biomimética propõe-se a estudar e construir sistemas mecânicos por analogias com os seres vivos (GERARDIN, 1968 apud RAMOS, 1993). A Tabela 2.I, abaixo, mostra a interligação das ciências anteriormente citadas.

CIÊNCIAS		
NATURAIS	EXATAS	HUMANAS
Botânica	Matemática	Psicologia
Zoologia	Física	Sociologia
Biologia	Engenharia	Antropologia
◀	Bioengenharia / Biomecânica ▶	
◀	Biônica / Biomimética ▶	
◀	Cibernética ▶	

Tabela 2.I – Localização da Biônica / Biomimética entre outras ciências e atividades (RAMOS, 1993).

2.2 – Termo Empregado Neste Trabalho.

Segundo o ponto de vista anteriormente mencionado, o melhor termo para designar o estudo objeto deste trabalho seria usando a palavra Biônica.

O problema reside em que sendo *Bionics* o termo em inglês correspondente à palavra Biônica, este pode ser confundido com a palavra *Bionic*, que é associada a uma área correlata mas mais fortemente ligada à reposição de partes do corpo humano com estruturas protéticas artificiais que tentam recompor funções naturais perdidas. Ainda mais, essa conotação da palavra foi consagrada pelos meios de comunicação através de trabalhos jornalísticos, bem como associada a filmes e seriados de origem norte americana.

Dessa maneira, muito embora o termo Biônica fosse teoricamente o mais adequado para a delimitação dos estudos aqui apresentados, preferiu-se a palavra Biomimética para o título deste trabalho pois esta exprime a intenção do mesmo de modo mais claro, segundo o estereótipo vigente.

Crê-se que uma solução para a questão da denominação desta ciência ou tecnologia seria a escolha de um dos nomes (na opinião deste autor: Biomimética) e a criação de subdivisões para enfocar tanto a composição de problemas com características ou microscópicas ou macroscópicas com aqueles com características ou qualitativas ou quantitativas, assim como aqueles ligados à próteses humanas.

2.3 - O Procedimento.

A mimese (imitação) é a base tanto da Biônica quanto da Biomimética.

Desde que a natureza otimiza seus “projetos” por razões que não são totalmente conhecidas, há uma justificativa limitada para a tentativa de uma emulação fiel desses “projetos”. Até certo ponto, a aproximação poderia ser a reexploração de certas características encontradas na natureza.” (HAYWARD, 1993).

Como a natureza produz sistemas que utilizam materiais e construções reais e de acordo com princípios físicos, o intento da mimese não significa que o desenvolvimento de tais sistemas será uma tarefa fácil, somente que tais sistemas são possíveis de serem desenvolvidos (JACOBSEN et al, 1986 apud HAYWARD, 1993).

A imitação da natureza para a produção de objetos e ferramentas ou resolução de problemas físicos e mecânicos é anterior a origem da palavra sendo uma idéia antiga, talvez tão antiga quanto o próprio homem. Não estariam a habitação de cavernas e utilização de vestimentas baseadas no comportamento e configuração dos animais? A utilização de lanças baseadas nos cornos dos animais? A confecção das redes de pesca baseadas nas teias das aranhas?

Entretanto, só em data relativamente recente é que se tem notícia da imitação sistemática da natureza, principalmente depois do Renascimento do qual a humanidade possui registros de projetos de diversos inventores, pensadores, sábios, arquitetos, engenheiros e designers que se utilizaram das formas de plantas, animais, peixes, insetos e aves.

Como exemplo temos os projetos atribuídos a Leonardo da Vinci que estudou o vôo das aves com o objetivo de fazer voar o homem bem como a forma dos peixes para o aprimoramento de cascos de navios. (BIONICS, 1980).

Para a realização das observações Biomiméticas, OFFNER (1974) sugere os seguintes passos:

Passo 1 - Observação tridimensional (3D) da natureza com a utilização de exemplares dos próprios elementos naturais.

Passo 2 - Registro fiel das observações seja no plano (2D) através de esboços e desenhos seja no espaço (3D) através de modelos.

Passo 3 - Extrapolação das formas, princípios e soluções observadas na natureza para configurações passíveis de serem executadas com a tecnologia disponível. Normalmente executada em 2D

Passo 4 - Materialização tridimensional do projeto do item anterior.

A Biônica e a Biomimética podem ser consideradas uma técnica de criatividade tal como o Brainstorming, a Sinética, e a Técnica da Caixa Preta. Mais particularmente é um procedimento que estimula a criatividade e que freqüentemente faz uso associado de uma ou mais das técnicas de criatividade.

Alguns julgam estas ciências como técnicas de criatividade em si, sendo este um ponto controverso. Crê-se que não se tratam de técnicas de criatividade em si, mas um conjunto de técnicas e ferramentas que num primeiro momento observam e tentam imitar a natureza.

É justamente a passagem do mundo natural (passo 2) para o mundo artificial (passo 3) a etapa mais difícil de ser executada, onde são necessários conhecimentos gerais e específicos, intuição e criatividade que pode ser estimulada através de técnicas de criatividade que possam auxiliar o processo de associação entre o que se observa na natureza e a tecnologia que se dispõe no momento.

Geralmente utilizam-se os princípios, técnicas e procedimentos da Biônica / Biomimética quando outros caminhos usuais de desenvolvimento já se acham esgotados ou não revelaram resultados satisfatórios ou quando queremos tentar inovações nos projetos.

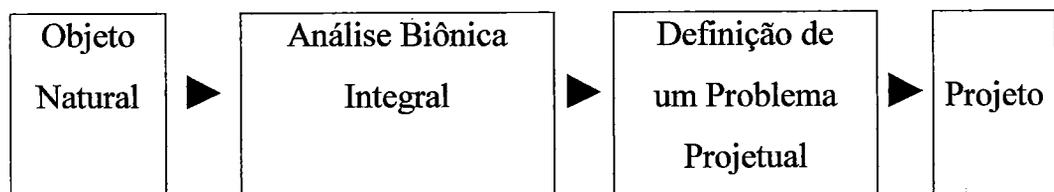
A Biomimética pode contribuir para o processo de desenvolvimento e planejamento de produtos principalmente na fase inicial do desenvolvimento conceitual, mais especificamente na procura de idéias para propostas de produto,

bem como na fase de procura e otimização de princípios de solução já adotados. Em ambas a Biomimética pode oferecer um poderoso estímulo criativo para que sejam feitas novas interpretações dos sistemas naturais conhecidos, aplicando as idéias geradas a partir dessas leituras no desenvolvimento de produtos inéditos (RAMOS, 1993).

Segundo (BOMBARDELLI, 1985 apud RAMOS, 1993), para viabilizar a aplicação da Biomimética em projetos, podem ser adotados procedimentos que variam em função dos objetivos de cada aplicação. Estes procedimentos são:

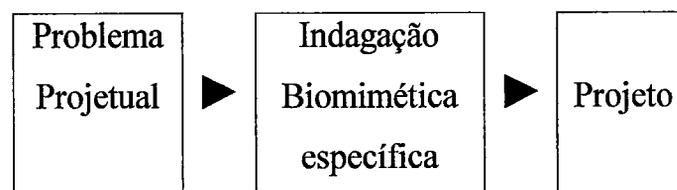
Procedimento 1:

A partir de um objeto natural surge uma idéia para um produto.



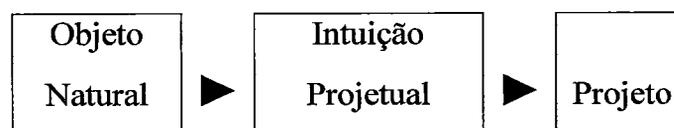
Procedimento 2:

A partir de um problema de projeto são buscadas soluções na natureza.



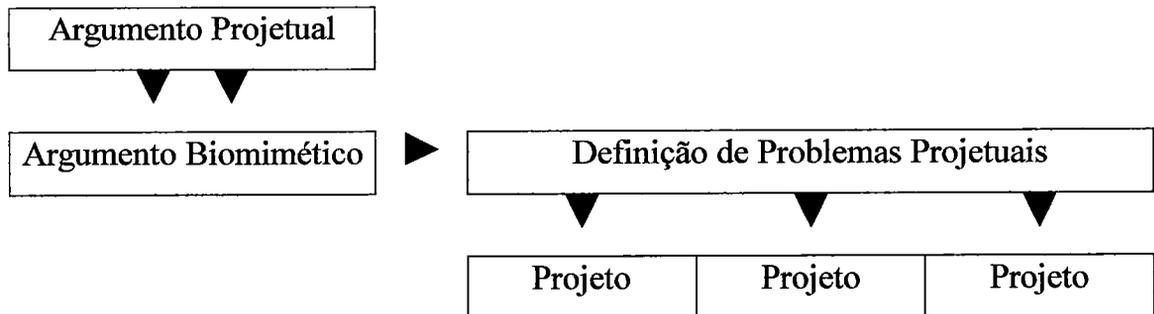
Procedimento 3:

A descoberta de soluções à partir da observação e da intuição.

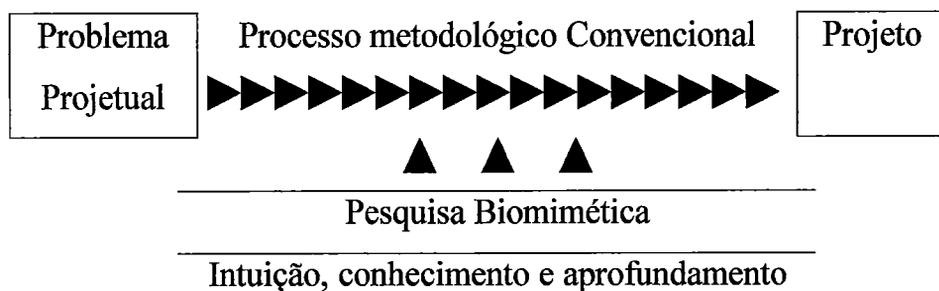


Procedimento 4:

A busca de soluções a partir de um argumento projetual, ou seja uma função a ser cumprida.

**Procedimento 5:**

A pesquisa básica fornecendo apoio à pesquisa aplicada.



Este trabalho se enquadra melhor dentro do Procedimento 4, ou seja foi definido um argumento projetual baseado em uma função que deva ser cumprida por um produto, que neste caso foi “resistência ao impacto”, depois foram buscadas analogias na natureza centradas no problema de resistência ao impacto, foi escolhida uma das analogias, estudada mais profundamente com vistas à uma aplicação projetual.

Como a aplicação prática não estava definida desde o início, neste ponto o resultado deste trabalho se aproxima do Procedimento 5, ou seja, seu resultado se aproxima da pesquisa básica que poderá servir, no futuro, para uma pesquisa aplicada

2.4 – Classificação dos Sistemas Vivos.

Para melhor estudar os sistemas vivos ou seres vivos, a Biônica e a Biomimética fazem uso de uma classificação especial baseada nas primeiras classificações taxonômicas usadas pelas ciências biológicas, já que a classificação taxonômica utilizada atualmente pelas ciências biológicas é restritiva para o que se pretende (taxonomia clássica de Lineu) pois é baseada principalmente na extrapolação de similaridades estruturais e/ou anatômicas com categorias arbitrárias, resultando em divisões e subdivisões que são: Reino, Filo, Classe, Ordem, Família, Gênero e Espécie.

Sendo assim além da classificação usual das ciências biológicas, uma classificação mais adequada para a Biônica e para a Biomimética, e por isso mais comumente adotada, é aquela baseada no ambiente operacional principal onde os sistemas vivos exercem sua função, sendo que estes sistemas vivos podem ainda ser subclassificados de acordo com a sua aproximação dos sistemas técnicos humanos e de acordo com o estado da arte pois desta maneira podem ser melhor aproximados da classificação usual dos sistemas técnicos humanos.

OFFNER (1974), propõe uma classificação baseada no ambiente operacional principal onde os seres exercem suas funções, com uma subclassificação para aproximação das capacidades destes seres às dos sistemas técnicos humanos. Uma aplicação desta classificação pode ser vista nas Tabelas 2.IIa e 2.IIb, onde também podem ser observados exemplos de aplicação da Biônica e da Biomimética.

RAMOS (1993) propõe uma classificação semelhante, mas baseada não no ambiente operacional, mas sim nas funções desempenhadas pelo sistema vivo. As funções abordadas são: Aderir, Aerodinamizar, Deslizar, Estruturar, Fixar, Localizar, Movimentar, Puxar, Planar, Texturizar e Unir. Um exemplo de cada uma das funções pode ser visto nas Tabelas 2.IIIa, 2.IIIb e 2.IIIc. Nestas Tabelas foram citados 20 exemplos dos 46 disponíveis na referida obra.

RAMOS (1993) também propõe uma classificação em ordem alfabética e oferecendo grande quantidade de detalhes de cada uma das estruturas naturais observadas e que pode ser consultada isoladamente ou após uma prévia consulta à classificação funcional.

2.5 – Aplicações da Biônica e da Biomimética e Estado da Arte.

Algumas aplicações da Biônica e da Biomimética já foram antecipadas no item anterior (Tabelas de 2.IIa a 2.IIIc), quando se falou do sistema de classificação. Em especial, incorporou-se na segunda parte da Tabela 2.IIb um exemplo objeto deste trabalho.

A seguir serão apresentadas através de exemplos, dentre as inúmeras disponíveis, outras aplicações ou possíveis aplicações baseadas na Biônica e na Biomimética. Estes exemplos não seguirão uma organização como mencionada no item anterior pois este não é o objetivo deste trabalho.

Leonardo da Vinci (1452-1519) pode ser mencionado como um ilustre precursor da metodologia de projeto baseada na observação da natureza. Leonardo fez extensos estudos sobre as asas dos pássaros na tentativa de imitar o seu vôo.

Até onde se sabe, essas tentativas não tiveram sucesso. Ele provavelmente se convenceu que a imitação do vôo não poderia ser obtida por mecanismos de batimento de asas acionados pela força muscular (Figura 2.1a) e imaginou o uso de molas para fornecer potência (Figura 2.1b). Não obstante, é provável que a tentativa de utilizar forças aerodinâmicas de uma maneira mais eficiente levou-o a imaginar o famoso "parafuso de ar" (Figura 2.1c)" (HAYWARD, 1993).

Identificação do Sistema Vivo		Adaptações à Técnica Humana			
Ambiente operacional Principal	Espécie (nome vulgar)	Característica observada	Aplicação	Aproximação dos Sistemas Técnicos Humanos	Estado da Arte
Local	Semente do Olmo (semente alada)	Fixação de uma asa ao corpo ou estrutura	Melhoramentos de moinhos de vento e helicópteros	Sistema para transferência de energia	Sugestão
Local	Bambu (caule)	Estrutura em fibra, composta por duas fases	Plásticos reforçados com fibra de vidro	Sistema para transferência de matéria	Em uso
Água	Baleia	Corpo que requer pouca energia de propulsão	Possibilidade de redução de 25% da energia gasta na movimentação, mantendo a mesma carga e a mesma velocidade	Sistema para transferência de matéria e energia	Em estudo
Água	Peixe Pério Phtalmus	Olho em pedículo delgado com possibilidade de movimentação para cima / baixo, dentro / fora	Periscópios	Sistema para transferência de informação	Em uso
Ar	Abelhas	Olhos segmentados / facetados, com filtro polarizador da luz solar	Bússola celeste confiável	Sistema para transferência de informação	Em uso

Legenda:

AMBIENTE OPERACIONAL PRINCIPAL:

LOCAL: Seres que exercem suas funções localmente;

ÁGUA: Seres que exercem suas funções na água;

AR: Seres que exercem suas funções no ar;

TERRA: Seres que exercem suas funções na terra;

ESPÉCIE (GERAL): Característica ou função comum à várias espécies.

APROXIMAÇÃO DOS SISTEMAS TÉCNICOS HUMANOS:

Sistemas para transferência de: MATÉRIA; INFORMAÇÃO; ENERGIA e sistemas para CONTROLE;

ESTADO DA ARTE: em ESTUDO; apenas SUGESTÃO; em USO.

Tabela 2.IIa – Classificação dos seres vivos com interesse para a Biônica / Biomimética segundo o ambiente operacional principal. (OFFNER, 1974)

Identificação do Sistema Vivo		Adaptações à Técnica Humana			
Ambiente operacional Principal	Espécie (nome vulgar)	Característica observada	Aplicação	Aproximação dos Sistemas Técnicos Humanos	Estado da Arte
Ar	Traça e Mariposa	Antena como órgão olfativo	Deteção de gases venenosos em minas	Sistema para transferência de informação	Em estudo
Terra	Homem	Senso de aceleração devido a estrutura especializada localizada no ouvido interno	Acelerômetro	Sistema para transferência de informação	Em uso
Terra	Serpentes	Visão termoscópica com sensibilidade de 0,002 graus centígrados	Sensor térmico	Sistema para transferência de informação	Sugestão
Terra	Carneiros	Crânio resistente a impactos e sistema de absorção de impactos	Capacetes, parachoques e outras estruturas que devam suportar impactos	Sistema para transferência de energia	Em estudo
Terra	Bois Almiscarados	Crânio resistente a impactos e sistema de absorção de impactos	Capacetes, parachoques e outras estruturas que devam suportar impactos	Sistema para transferência de energia	Em estudo

Tabela 2.IIb – Classificação dos seres vivos com interesse para a Biônica / Biomimética segundo o ambiente operacional principal. (OFFNER, 1974 - adaptada)

Legenda:
AMBIENTE OPERACIONAL PRINCIPAL:
LOCAL: Seres que exercem suas funções localmente;
ÁGUA: Seres que exercem suas funções na água;
AR: Seres que exercem suas funções no ar;
TERRA: Seres que exercem suas funções na terra;
ESPÉCIE (GERAL): Característica ou função comum à várias espécies.
APROXIMAÇÃO DOS SISTEMAS TÉCNICOS HUMANOS:
 Sistemas para transferência de: **MATÉRIA; INFORMAÇÃO; ENERGIA** e sistemas para **CONTROLE; ESTADO DA ARTE;** em ESTUDO; apenas **SUGESTÃO;** em USO.

Função de Interesse	Espécie (nome vulgar)	Característica observada	Aplicação
Aderir	Lagartixa	Patas em forma de pás flexíveis que permitem grande aderência em superfícies lisas.	Solas de sapatos, Dispositivos para melhorar a aderência entre superfícies.
Aerodinamizar	Golfinho ou Delfin	A pele desse animal possui um sistema amortizante viscoelástico que elimina qualquer turbulência que venha a surgir ao longo de seu corpo, durante o deslocamento veloz.	Revestimento antiturbulência, na forma de pele artificial, aplicável em veículos aquáticos. O objetivo desta pele é reduzir a resistência que a água oferece ao deslocamento.
Deslizar	Serpentes (escamas)	A forma das escamas facilita o deslocamento para a frente e dificulta o deslocamento para trás.	Superfícies com atrito direcional, ou seja, superfícies que facilitem o deslocamento em um sentido e dificultem o no outro. Solução aplicável em esquis, trenós, solas, correias transportadoras dentre outros.
Estruturar	Abelha	A forma hexagonal do favo de mel da colméia, contém a maior quantidade de mel, utilizando a menor quantidade de cera e energia para ser construída.	A forma da colméia é aplicável em estruturas do tipo sanduíche, compostas por células hexagonais, que combinam leveza e resistência mecânica.
Estruturar	Árvores (tronco)	O tronco de algumas árvores apresenta saliências que partem do cilindro do tronco, reforçando sua base.	Pilares com secção de diâmetro maior na base, com saliências na mesma e secção circular no topo.
Estruturar	Concha	Ondulações longitudinais reforçadas por ondulações menores na mesma direção e por ondulações perpendiculares às anteriores, que garantem a resistência às forças de tração e compressão, com um mínimo de material.	Construção de painéis e de coberturas.
Estruturar	Esqueleto	O esqueleto dos vertebrados é uma estrutura leve, resistente e versátil. A disposição dos ossos, músculos e tendões é a melhor resposta aos tipos de esforço que o animal suportou ou suporta.	Estruturas compostas por elementos submetidos à tração e à compressão. Articulações de dispositivos técnicos. Mecanismos com movimentos análogos aos do esqueleto, inclusive próteses.

Tabela 2.IIIa – Classificação dos seres vivos de interesse para a Biônica / Biomimética segundo a função desempenhada (RAMOS, 1993).

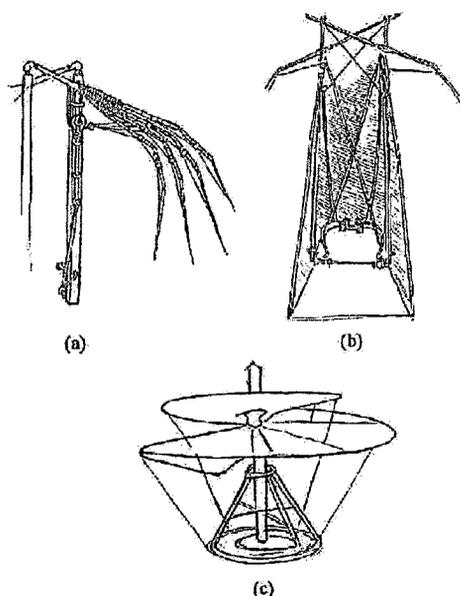
Função de Interesse	Espécie (nome vulgar)	Característica observada	Aplicação
Estruturar	Ovo	A casca do ovo atende a duas exigências antagônicas: deve ser resistente para proteger o pássaro e deve ser quebrável para facilitar a saída do mesmo.	Embalagem para alimentos.
Estruturar	Osso	O osso apresenta resistência a esforços de tração e compressão, graças à sua forma externa e à sua configuração interna	Construções reticuladas tais como coberturas, pontes, torres e vigas.
Estruturar	Sâmara (Acer campestre)	Esta semente em forma de asa possui um feixe de nervuras, que partem do núcleo da mesma e se dirigem até a borda, garantindo a resistência a esforços de torsão e flexão.	Construção de superfícies leves com a utilização de nervuras orientadas.
Estruturar	Tartaruga (Carapaça)	A carapaça da tartaruga apresenta forma de esfera achatada, com junções e grande resistência a esforços.	Construção de estruturas derivadas da esfera, destinadas a cobrir ou proteger superfícies.
Fixar	Carrapicho	Ganchos que se fixam nos pêlos dos mamíferos ou na roupa de humanos, que carregam a semente para um local, contribuindo para dispersá-la.	Dispositivos de fixação de peças que devam ser unidas e separadas várias vezes com facilidade. Velcro®: fechamento de roupas, calçados e união de objetos.
Localizar	Golfinho ou Delfin	Eco-localizador biológico que pode emitir pulsos com frequência variável de 4 a 170 KHz. As frequências baixas permitem explorar o ambiente e as frequências altas permitem identificar e localizar presas com precisão.	Aperfeiçoamento de dispositivos de detecção subaquática.
Movimentar	Minhoca	A minhoca movimenta-se pela contração e alongamento dos músculos longitudinais e circulares, existentes nos segmentos que constituem seu corpo.	Veículos robotizados para locomoção em locais de difícil acesso, por exemplo em tubos de diâmetro reduzido ou locais insalubres como usinas nucleares.

Tabela 2.IIIb – Classificação dos seres vivos de interesse para a Biônica / Biomimética segundo a função desempenhada (RAMOS, 1993).

Função de Interesse	Espécie (nome vulgar)	Característica observada	Aplicação
Movimentar	Morcego	Asa dobrável, constituída por ossos delgados recobertos por uma membrana flexível. Essa membrana infla, formando pequenas bolhas de formato semi-esférico, que absorvem o impacto da batida contra o ar durante o voo.	Velas (para veículos movidos pela força do vento), em material flexível, capaz de absorver os golpes decorrentes de deslocamentos repentinos do ar, diminuindo o esforço sobre a estrutura de sustentação.
Movimentar	Peixes (cauda)	As barbatanas da cauda dos peixes fornecem os movimentos necessários à propulsão, com ótimo aproveitamento da energia.	Dispositivos para o deslocamento de veículos aquáticos. Dispositivos para deslocamento ou agitação de fluidos.
Movimentar	Pernas (insetos)	Os insetos possuem três pares de patas que permitem o deslocamento, sem problemas de equilíbrio.	Robôs que caminham de modo análogo aos insetos.
Puxar	Músculos (braço)	A contração / distensão dos músculos, somada à combinação de movimentos entre músculos que trabalham em oposição, permite movimentos precisos em todas as direções.	Músculos artificiais que incham (encolhendo) ou desincham (esticando), para serem utilizados em máquinas em geral, inclusive robôs e próteses.
Planar	Pássaros (asa do albatroz)	Ponta das asas afiladas e em forma de flecha para reduzir a turbulência marginal. Asas compridas e estreitas que permitem pairar por muito tempo sem necessidade de batê-las.	Asas de planadores, aviões e outros dispositivos capazes de planar.
Texturizar	Morango	O morango possui uma superfície externa coberta por sementes de forma esferoidal.	Superfícies de interface tátil (homem / objeto técnico)
Unir	Crânio Humano	O encaixe das partes da calota craniana dá-se por meio de linhas sinuosas cujas irregularidades externas não coincidem com as internas.	União de materiais sólidos na forma de placas. Pisos de concreto. Pisos de estradas.

Tabela 2.IIIc – Classificação dos seres vivos de interesse para a Biônica / Biomimética segundo a função desempenhada (RAMOS, 1993).

Figura 2.1 – Projetos de Leonardo da Vinci: (a) mecanismo de batimento de asas acionados pela força muscular; (b) mecanismo de batimento de asas acionados pela força muscular e com o uso de molas para fornecer potência; (c) "parafuso de ar" (HAYWARD, 1993).



Depois de observar as formas dos peixes e desenvolver estudos sobre a ação da água, da Vinci desenhou, conforme a Figura 2.2, navios com cascos de grande estabilidade e fricção menor que os existentes até então, cujos fundos arredondados dificultavam o deslocamento da água. Estes projetos são próximos aos utilizados pela moderna engenharia e arquitetura navais (SANTOS, 1987).

A planta aquática Vitória Régia tem uma superfície que atinge até dois metros de diâmetro, sendo composta por um disco plano e seco no lado superior, circundado por uma borda de dez centímetros de altura e com o lado inferior submerso, reforçado por nervuras que partem do centro e se dividem várias vezes por bifurcação, gerando 32 nervuras ao atingir a borda (Figura 2.3(a)). Devido à sua rigidez radial, esta folha gigante pode até mesmo suportar o peso de uma pessoa ou ser deslocada sem dano enquanto flutua (RAMOS, 1993).

Pouco antes de 1850, Joseph Paxton viu as folhas da Vitória Régia e notou que sua superfície era sustentada por uma série de “vigas”. Após alguma elaboração projetou e construiu uma estufa ou *greenhouse* no *Chatsworth Park* (Figura 2.3(b)). Posteriormente, em 1850, usa este mesmo conceito para o projeto de todo o telhado do *Crystal Palace* (VINCENT, 1997).

Figura 2.2 – Modelos de perfis de cascos de navios (cada um dos lados do modelo, ilustra um desenho diferente), reproduzidos à partir de projetos de Leonardo da Vinci. (SANTOS, 1987).

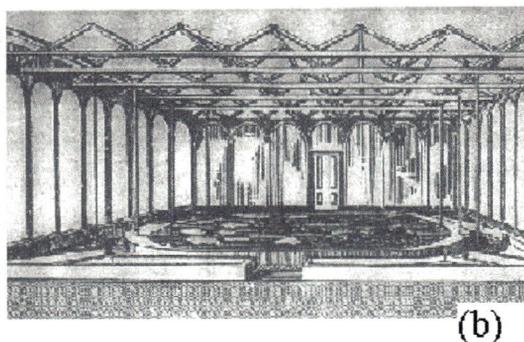
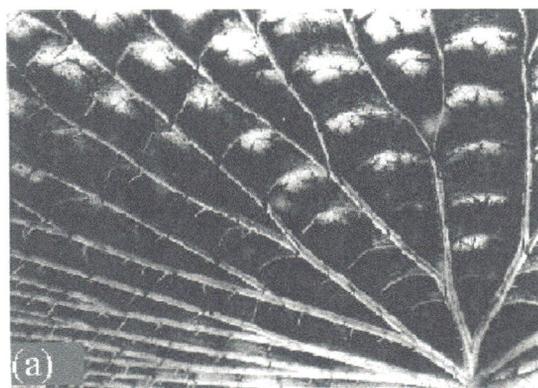
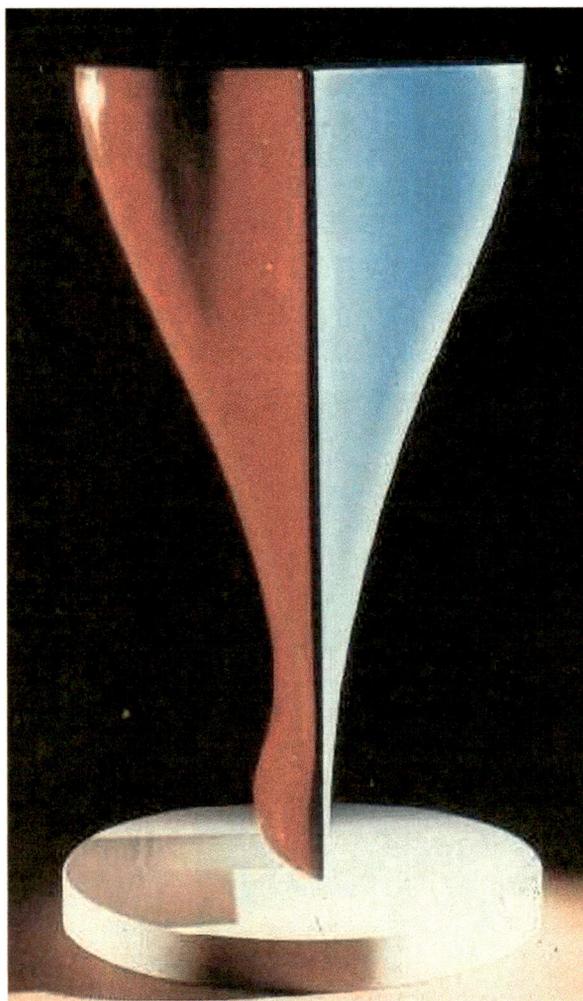


Figura 2.3 – (a) Folha da Vitória Régia vista por baixo e (b) Ilustração da estufa (*greenhouse*) do *Chatsworth Park* (VINCENT, 1997).

Clément Ader em 1890, seguindo o modelo do morcego (Figura 2.4), contrói o L'Eole. Este aparelho, segundo testemunhos da época, teria realizado a primeira decolagem de uma máquina mais pesada que o ar, movida a motor (ANGELUCCI, 1971 apud RAMOS, 1993)

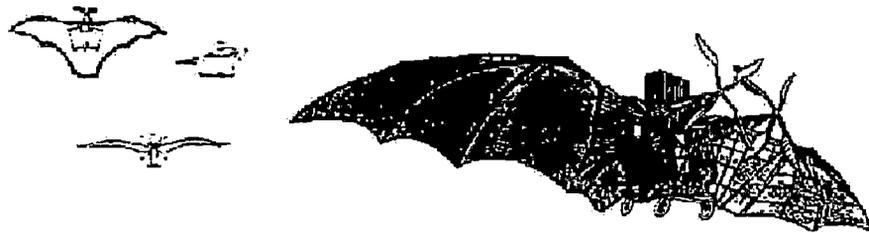


Figura 2.4 – L'Eole – máquina voadora de Clément Ader (ANGELUCCI, 1971 apud RAMOS, 1993)

O engenheiro alemão Frei Otto, estudou diversas formas da natureza para otimizar o projeto de estruturas. Dentre elas: as formas marinhas que foram publicadas na forma de catálogo e serviram de inspiração para os arquitetos buscarem novas formas de construir; teias de aranha para a construção de estruturas tensionadas como a da Vila Olímpica de Munique; a coluna vertebral humana que serviu de modelo para o protótipo de grua para a torre da antena da Universidade de Stuttgart e a estrutura das árvores (Figura 2.5) que serviu de base para a construção de diversas estruturas de telhados, dentre elas o Palácio do Trabalho de Turim, o aeroporto de Stuttgart e uma construção na Arábia Saudita (RAMOS, 1993; VINCENT, 1997 e LEON, 1994).

Na arquitetura, diversos profissionais se utilizaram da inspiração em formas naturais para elaborar seus projetos. Dentre eles, Buckminster Fuller se inspirou em ouriços e algas unicelulares para projetar uma cúpula geodésica para a Exposição Internacional de Montreal de 1967 e Gaudí nos troncos de árvores para elaborar as colunas da Igreja da Sagrada Família e do Parque Güell de formas (LEON, 1994).

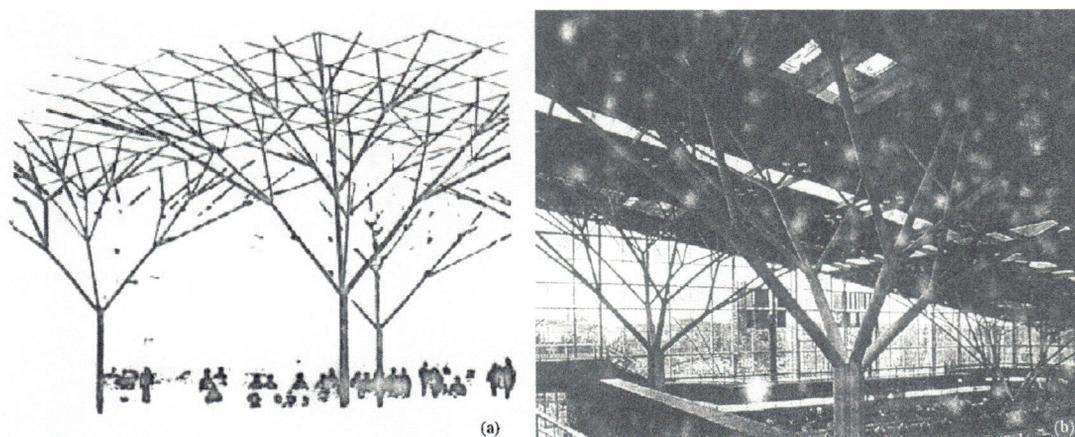


Figura 2.5 – (a) Estruturas arboriformes de Frei Otto e (b) Aeroporto de Stuttgart (RAMOS, 1993 e VINCENT, 1997)

Embora não tendo, até o momento, uma menção explícita da contribuição da natureza a alguns dos principais artefatos voadores de Santos Dumont, é interessante notar as semelhanças entre eles conforme mostram as Figuras 2.6 e 2.7.

Como os franceses do início do século gostavam de por apelidos em tudo, chamaram o 14bis de Santos Dumont de *Canard*, que significa pato em francês, pois o achavam pescoçudo e desengonçado, parecendo um pato ao levantar vôo (Figura 2.6) (GUIMARÃES, 1996).

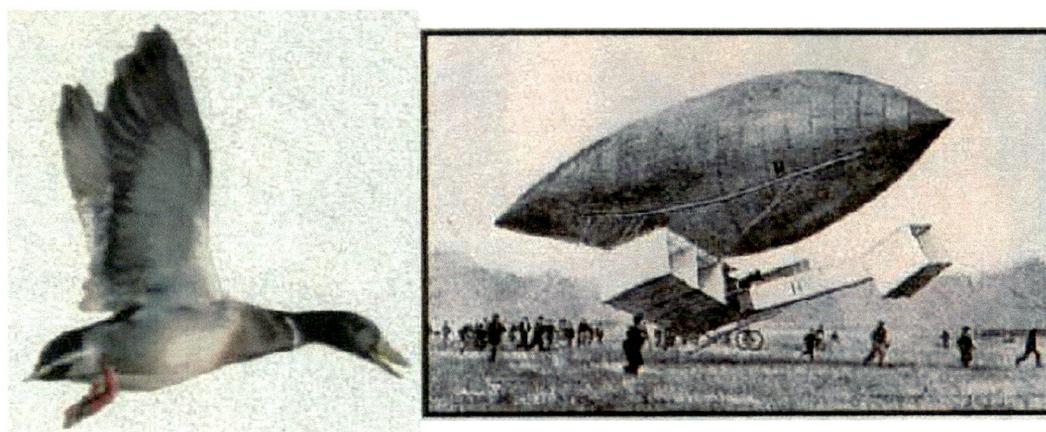


Figura 2.6 – (a) Um pato (*canard*) e (b) O 14bis em fase de testes acoplado ao balão 14 (GUIMARÃES, 1996).

Também no início deste século, na França, as libélulas eram chamadas de *demoiselle*, cujo significado é senhorita, numa clara referência à sua delicadeza. A semelhança entre o inseto e as asas forradas de seda de um dos aviões de Santos Dumont, como as saias das moças (senhoritas) da época, definiram o nome deste artefato (Figura 2.7). Ainda mais, o corpo do primeiro *Demoiselle* era formado apenas por uma haste de bambu amarrada a cabos (GUIMARÃES, 1996).

Quando na década de 70 alguns engenheiros da NASA tiveram a idéia de adicionar à asa delta um pequeno motor e posteriormente a este projeto, trocar as asas inteiriças por duas asas forradas com tecido impermeável e agregar um assento e um trem de pouso, o resultado ficou muito parecido com o *Demoiselle*. Os ultraleves de hoje, têm desenho muito parecido com o ancestral *Demoiselle*, mas a seda das asas foi substituída por um poliéster chamado *Dracon* (Figura 2.8) (GUIMARÃES, 1996).

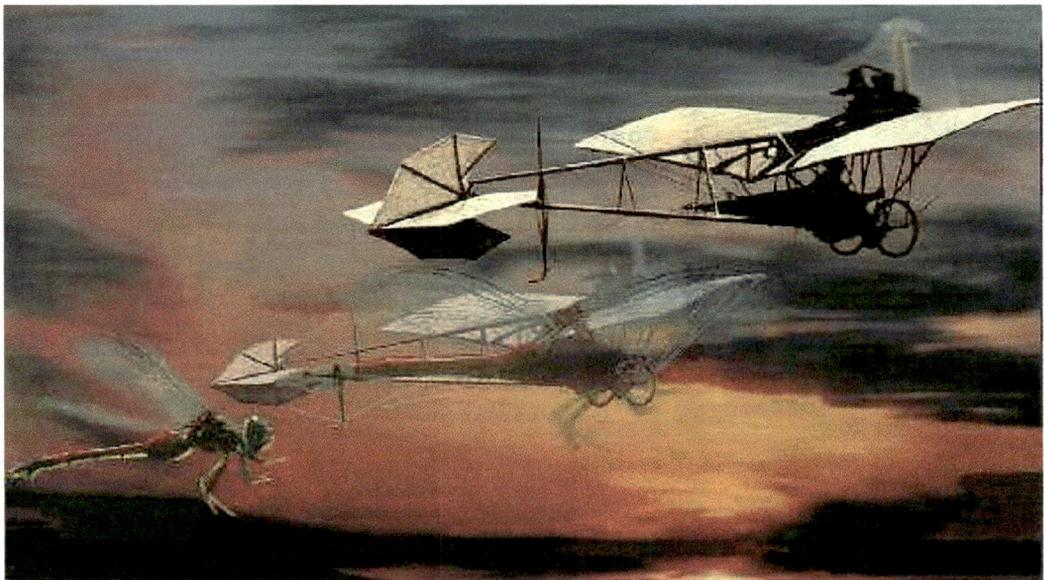


Figura 2.7 – Semelhança entre uma libélula e o *Demoiselle* (GUIMARÃES, 1996).



Figura 2.8 – Evolução do Demoiselle para os atuais ultra leves
(GUIMARÃES, 1996).

Nas décadas de 50 e 60, aplicações da Biomimética são encontradas principalmente na área militar. Sabe-se que a ex União Soviética e a China desenvolveram nesse período e após aplicações com base na Biomimética, mas devido à política adotada por esses países na época, não foram obtidos, até o momento, registros desses projetos. Tem-se notícia principalmente de estudos desenvolvidos pelas forças armadas americanas através de artigos da década de 60

Em (BARNES, 1967), dentre outros projetos, encontra-se o de uma torre de tiro para tanques de guerra. A forma externa e os sistemas internos do mexilhão, inspiraram este projeto de uma cúpula externamente montada para dois homens. Os dois requisitos mais importantes para esta cúpula de canhão são: ter uma forma e espessura adequadas para resistir à penetrações balísticas e ter um sistema de exaustão dos gases provenientes da arma para fora do compartimento.

A concha do mexilhão tem uma forma que se espera tenha propriedades antibalísticas devido à sua forma e a torre foi projetada para ter duas aberturas

(uma para cada homem) como são duas as partes da concha. O sistema de funcionamento interno da torre de tiro foi baseado, conforme a Figura 2.9 no sistema digestivo do mexilhão.

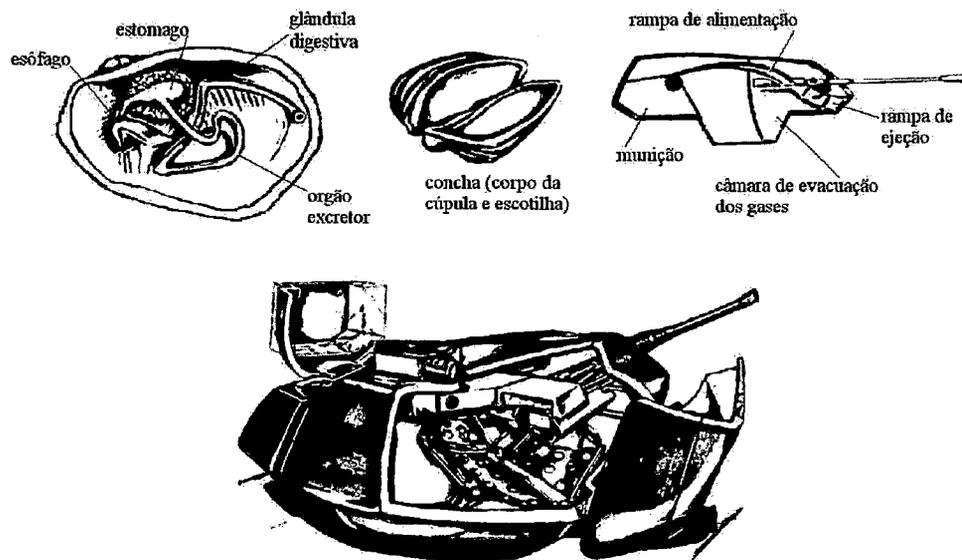
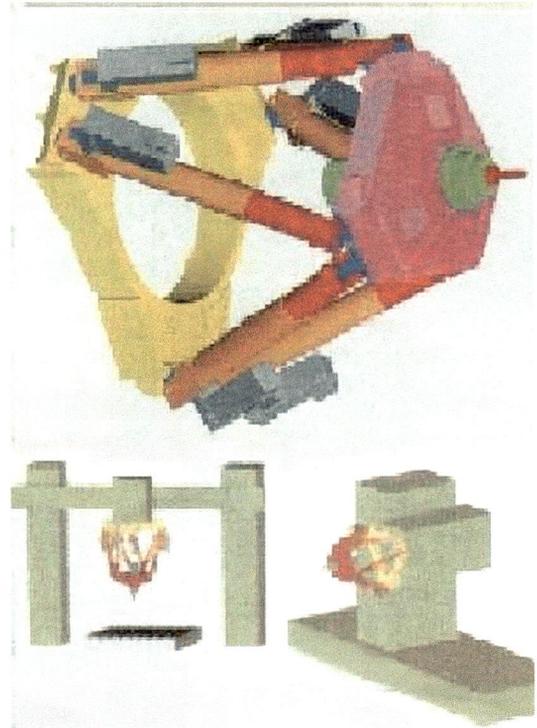


Figura 2.9 – Torre de tiro para tanques de guerra projetadas conforme a configuração externa e interna do mexilhão (BARNES, 1967).

Os cabeçotes para máquinas ferramenta do tipo hexápode, muito embora não tenha sido encontrada citação explícita se assemelham à configuração dos insetos que tem três pares de patas assim como este cabeçote tem três pares de acionadores. É de se esperar que o estudo de alguns tipos destes animais, particularmente aqueles que executam algum tipo de operação, movimentando o corpo enquanto parados como os pernilongos, possam contribuir para o desenvolvimento desse cabeçote.

Figura 2.10 - Cabeçote hexápode modelo CMW 300, produzido pela empresa CMW (França). Pode ser adaptado em uma máquina ferramenta na vertical ou/e na horizontal (SIMON, 1999).



Aplicações da Biomimética são comuns na área da robótica. Um estudo desenvolvido no Istituto Europeo di Design partiu de uma necessidade de projetar uma ferramenta versátil para ser utilizada em várias situações com a simples troca de acessórios terminais. A tromba do elefante e a coluna vertebral dos peixes foram a fonte de inspiração para o braço robótico batizado de Naturo 2 que é constituído de elementos de “pibiter”, material sintético muito resistente às solicitações de torção e peças corrediças de algoflon, movidas por tirantes acionados por um propulsor pneumático (Figura 2.11) (LEON, 1994)

A semente do Bordo, árvore nativa da América do Norte, tem o perfil aerodinâmico de uma hélice. Um dos pais da aeronáutica, o inglês George Cayley, desenhou um propulsor depois de observar o vôo dessa semente que cai da árvore girando em alta velocidade e pode percorrer 200 metros (Figura 2.12) (BIOLOGIA, 1993).

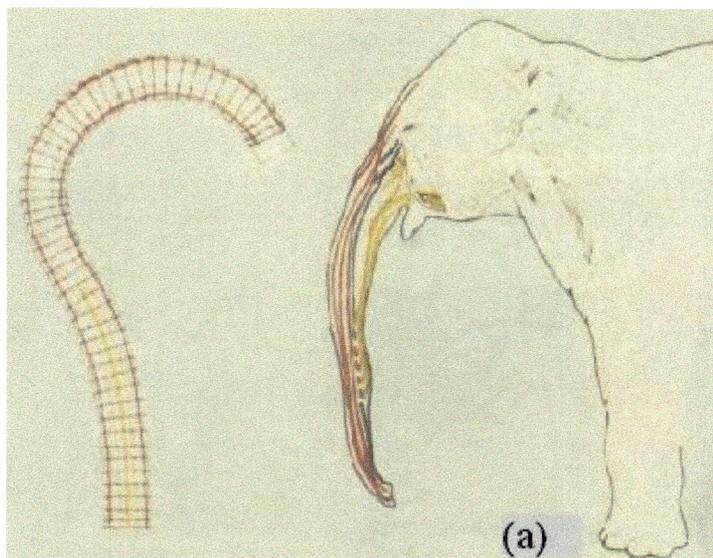
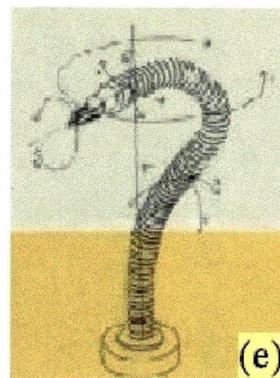
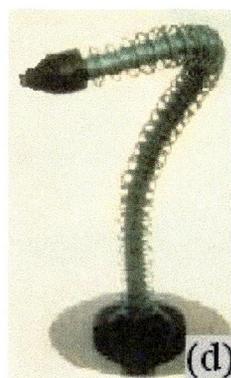


Figura 2.11 –
Braços robóticos
baseados na
tromba do elefante
(a) (d) e (e) e na
coluna vertebral de
peixes (b) e (c)
(LEON, 1994).



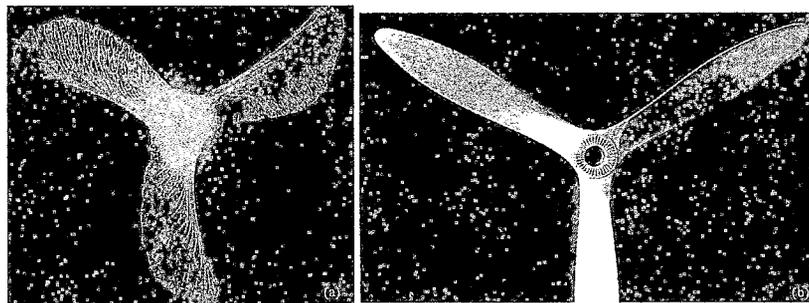


Figura 2.12 – (a) semente alada do Bordo e (b) Hélice (BIOLOGIA, 1993).

Uma lagartixa do sul da França tem as patas em formato de pás flexíveis, o que lhe permite agarrar-se até em vidro. O mesmo desenho na sola do sapato, ajuda o alpinista a escalar pedras escorregadias (Figura 2.13) (BIOLOGIA, 1993).

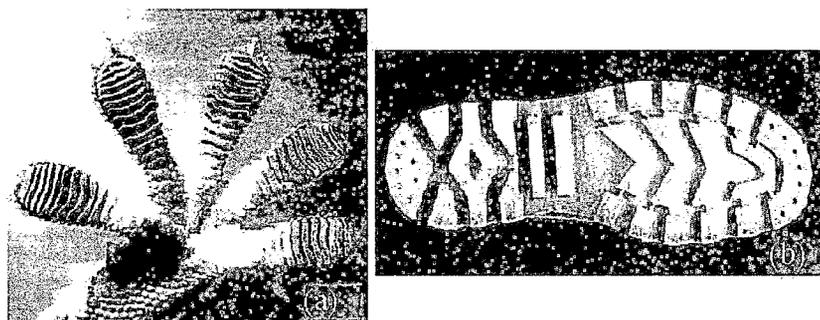


Figura 2.13 – (a) Pata de lagartixa e (b) solado de calçado para alpinistas (BIOLOGIA, 1993).

Inventado por um engenheiro suíço, o Velcro que amarra o tênis e diversos tipos de utensílios é uma cópia assumida das sementes e frutas espinhudas como o cardo. Os frutos do cardo, com as pontas em forma de gancho, se fixam nos pêlos de mamíferos (e na roupa dos humanos), carregando assim suas sementes para germinar mais longe (Figura 2.14) (BIOLOGIA, 1993).

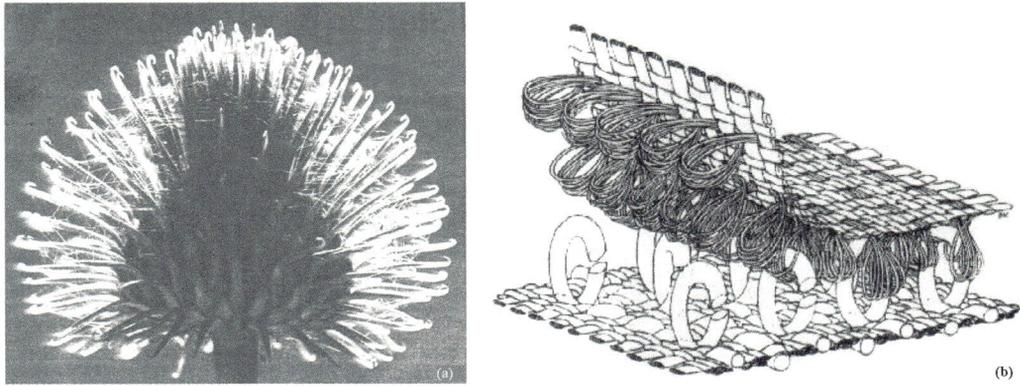
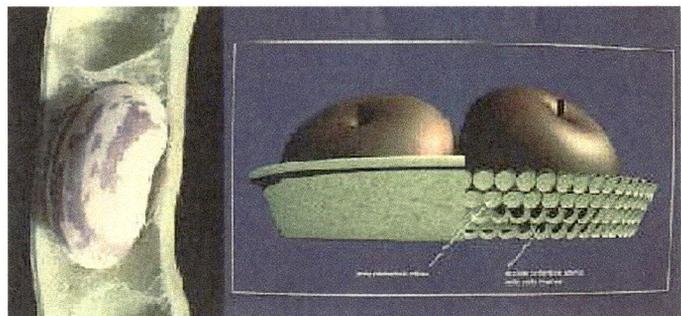


Figura 2.14 – (a) Fruto do Cardo e (b) esquema de funcionamento do Velcro (BIOLOGIA, 1993).

A vagem de leguminosas protegem e conservam as sementes até o momento da colheita ou da disseminação. Seu desenho foi utilizado como base para a construção de uma embalagem para longa conservação (Figura 2.15) (ISTITUTO EUROPEO DI DESIGN, 1995).

Figura 2.15 -
Embalagem para longa
conservação
(ISTITUTO
EUROPEO DI
DESIGN, 1995).



A configuração estética da estrela do mar foi usada como princípio para a construção do miolo de rodas de liga leve e conferiu à mesma rigidez estrutural (Figura 2.16) (ISTITUTO EUROPEO DI DESIGN, 1996).

Já o casco do tatu foi usado como base para o estudo de um novo tipo de capacete, adequado para absorver impactos.

O novo acessório assimila melhor o impacto, devido aos variados materiais e à geometria reticular do recheio protetor, como também à subdivisão do casco em seções.

Figura 2.16 – Estrela do mar e
roda de liga leve – estética e
rigidez (ISTITUTO EUROPEO
DI DESIGN, 1996).

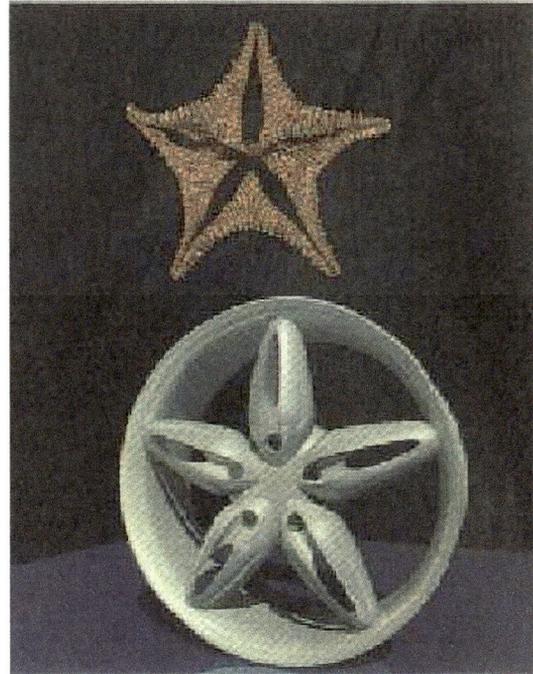
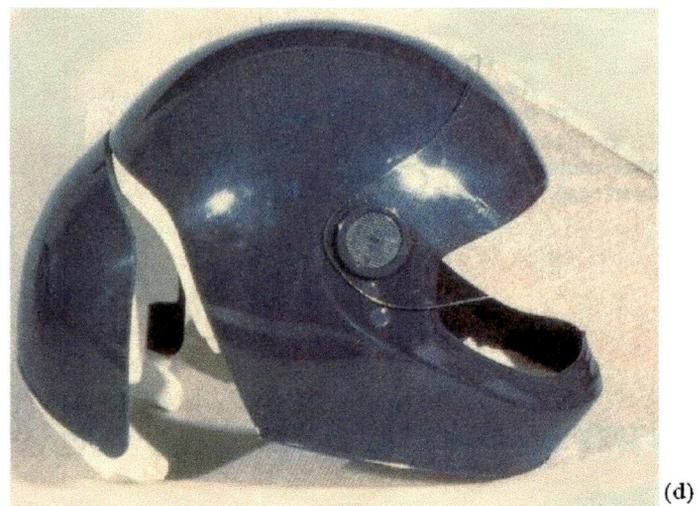
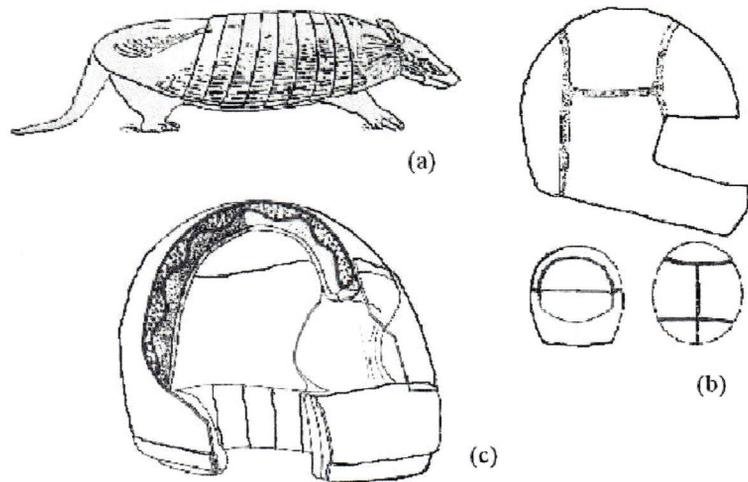


Figura 2.17 – (a)
Tatu, (b) Divisão
do capacete em
placas; (c) Corte
mostrando as
partes internas
do capacete e (d)
Protótipo do
capacete
(ISTITUTO
EUROPEO DI
DESIGN, 1997;
BOMBADELLI,
1994) e LEON,
1994).



As escamas dos répteis e as placas ósseas móveis do crânio dos recém-nascidos também serviram de referência para o desenho do capacete, visando a absorver linhas de choque tangenciais (Figura 2.17) (ISTITUTO EUROPEO DI DESIGN, 1997; BOMBADELLI, 1994) e LEON, 1994).

Também na área de novos materiais, especialmente os compósitos, a Biomimética pode ser útil conforme mostram as Figuras 2.18 e 2.19 onde podemos ver, respectivamente, uma proposta de um material composto baseado na configuração interna das árvores e um paralelo entre a estrutura do tendão e um cabo fibroso do tipo dos cabos de aço.

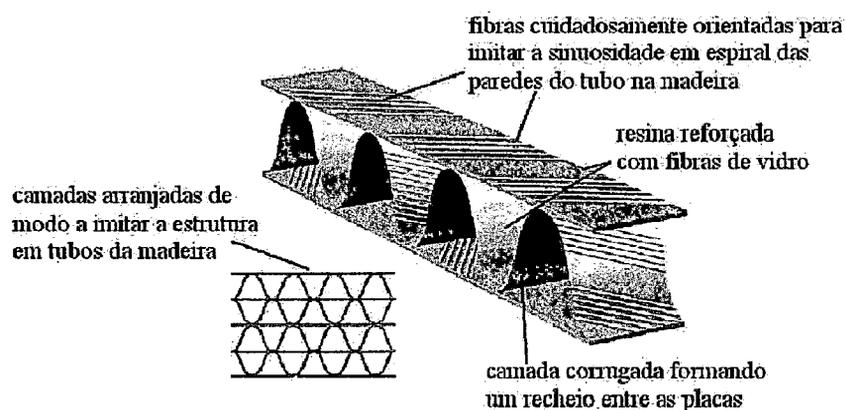


Figura 2.18 – Proposta de material composto com base na estrutura interna da madeira (VINCENT, 1996 e 1994)

Outras Aplicações:

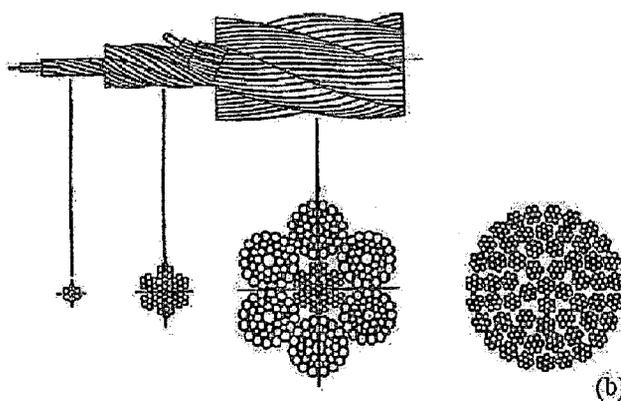
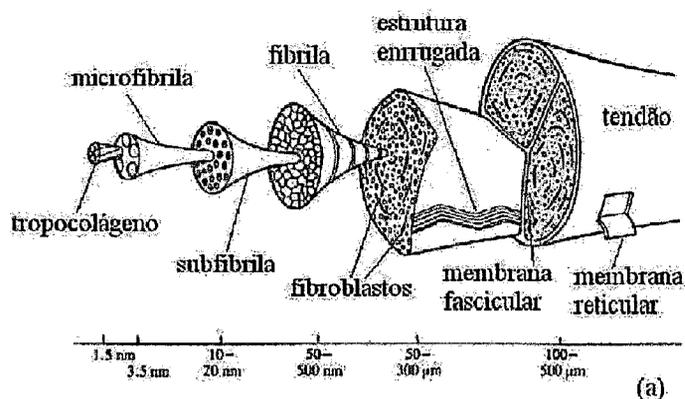
Analisando a bibliografia levantada até o momento sobre Biomimética / Biônica, notou-se que vários pesquisadores nacionais e internacionais obtiveram ou mencionaram aplicações técnicas práticas deste ramo da ciência. Como é relativamente recente, esta ciência não possui uma extensa bibliografia.

No Brasil, (HARRIS, 1993) faz um estudo, dentre outros, da resistência de cascas de ovos com o objetivo de aplicar este conhecimento na confecção de

cúpulas de edifícios; (FELISBERTO, 1996), faz um paralelo entre a organização do cérebro humano e a organização de empresas (COSTA E SÁ, 1982) estuda cristais naturais e artificiais com o objetivo de aplicar o conhecimento adquirido na construção de edifícios e produtos e (ULLER, 1999) fez um extenso estudo da Biomimética aplicada a materiais aeronáuticos.

No exterior, (BONSIEPE, 1978) sugere diversos estudos com base na biônica para a modularização e concepção de produtos, dentre eles uma modularização baseada na articulação de uma espécie de besouro e outra baseada nas espinhas de peixes; (BROECK, 1986) analisa as estruturas naturais sob o ponto de vista da estrutura e resistência dos materiais; (PEARCE, 1990) também estuda cristais naturais e artificiais com o objetivo de aplicar o conhecimento adquirido na construção de edifícios e produtos, sendo um exemplo o de um esquema de linhas usado no planejamento da arquitetura de edificações e (DOCZI, 1990) estuda as proporções e harmonias da natureza e sua aplicação em produtos, sendo um exemplo o estudo das proporções da natureza, particularmente a relação áurea no projeto de produtos tais como o Boeing 747.

Figura 2.19 – (a)
Estrutura do tendão
com escala. (b)
Ilustração de um cabo
de aço, sem escala,
(SRINIVASAN, 1994
e 1996 e
JERONIMIDIS, 1995)



2.6 - Pesquisa na Internet.

Através de uma pesquisa na rede mundial de computadores (internet) principalmente com as palavras chave biônica, *bionics* e *biomimetics*, foram obtidos diversos *sites*, principalmente de universidades alemãs, inglesas e americanas que se dedicam a este ramo da ciência. Dentre eles destacamos:

- Universität des Saarlandes – Saarbrücker (Alemanha),
- Technische Universität Berlin (Alemanha),
- Universität Dortmund (Alemanha),
- Landesmuseum für Technik und Arbeit in Mannheim (Alemanha),
- The Duke University (UK),
- Tetsuya Tateisch – Agency of Industrial Science and Technology (Japão),
- The University of Reading (UK) e
- Polish Academy of Sciences – Institute of Biocybernetics and Biomedical Engineering (Polônia).

No Brasil, o assunto também é estudado na

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC (Florianópolis – SC),

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Recife – PE) e

Laboratório Brasileiro de Desenho Industrial – SENAI (Florianópolis – SC)

2.7 – Considerações Finais.

Segundo (BRANDÃO, 1989) e (VINCI, 1989), as formas biológicas são mais agradáveis ao homem e adotando essas formas para produtos este procedimento poderá tornar, por exemplo, o ambiente de trabalho mais ameno. O que é interessante notar é que ao mesmo tempo que as formas da natureza conferem um aspecto estético - formal agradável, que podem ser incorporados às estruturas, esta mesma incorporação trás consigo vantagens de rigidez estrutural, leveza e multifuncionalidade, dentre outras.

Mas existem algumas diferenças fundamentais entre os sistemas naturais e os artificiais, construídos pelo homem:

- 1 – Os sistemas artificiais podem, com alguns conhecimentos técnicos e científicos gerais, ser decomposto em subsistemas estanques e estes por sua vez em partes. Já os sistemas naturais são basicamente uma unidade pois é comum que seu desenvolvimento completo se dê à partir de uma única célula. Nós é que percebemos partes e mesmo assim com fronteiras não definidas.
- 2 – As estruturas naturais normalmente se desenvolvem de modo hierarquizado muitas vezes seguindo uma ordem fractal
- 3 – O homem, buscando uma inovação, pode começar a projetar do zero enquanto que a natureza sempre parte de um princípio, modificando estruturas existentes por evolução (LDI/SC, 1988)
- 4 – Na natureza matéria prima e energia normalmente são de difícil obtenção devido à escassez ou à concorrência. Nas estruturas naturais o uso destes recursos é sempre otimizado.

3 – DEFINIÇÃO DO CAMPO DE TRABALHO.

Para o desenvolvimento de um trabalho original como tema para a tese de doutorado, a proposta inicial era a de dar continuidade ao projeto da fresadora (Figura 3.1), desenvolvida pelo autor durante sua dissertação de mestrado (FELISBERTO, 1994 e 1996). Havia duas possibilidades:

- a) estudar e propor melhorias na estrutura da máquina e
- b) desenvolver o projeto dos mecanismos do cabeçote reversível.

Optou-se por estudar a estrutura da máquina.

Para tal estudo, pensou-se em associar a tecnologia do Laboratório de Máquinas Ferramenta (Lamafe) da USP de São Carlos no desenvolvimento de máquinas ferramenta com os estudos desenvolvidos na UNESP de Bauru, junto ao Departamento de Desenho Industrial, na área de Biomimética, bastante explorada em *Design* para a concepção de novos conceitos para produtos (FELISBERTO, 1995)

Como recursos materiais e energéticos são escassos, as estruturas naturais devem fazer o melhor uso destes, e elas realmente o fazem, colocando os materiais e a energia nos pontos e na quantidade em que eles são necessários. Com base neste princípio esperava-se que o estudo de formas da natureza resistentes a esforços pudessem auxiliar o desenvolvimento de máquinas ferramenta.

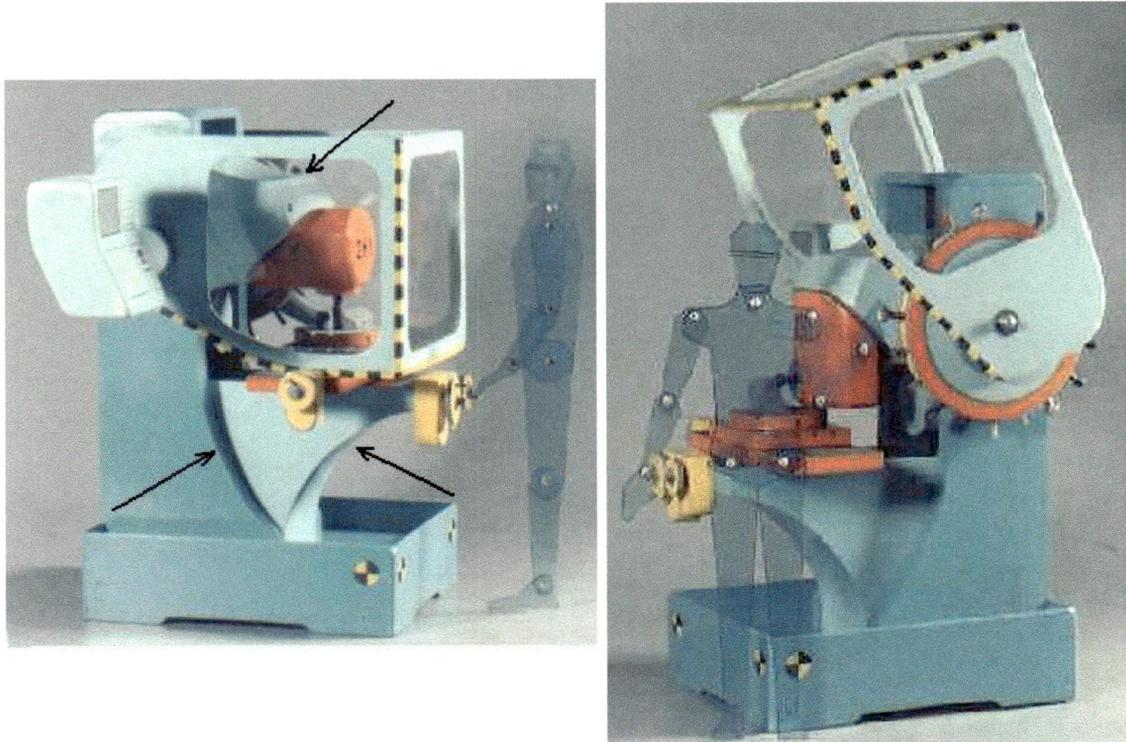


Figura 3.1 – Modelo em madeira na escala 1:5 da fresadora desenvolvida por FELISBERTO (1994), juntamente com um modelo humano masculino na mesma escala para o percentil 50% da população.

3.1 – Busca de uma Aplicação da Biomimética / Biônica em Máquinas Ferramenta.

As raízes, tronco e galhos das árvores são estruturas naturais que podem ser utilizadas como modelo para o desenvolvimento de estruturas construídas pelo homem. Esta idéia não é nova e já foi explorada, por exemplo, na arquitetura por Antonio Gaudi na construção do Parque Güell e das pilastras de sustentação da Igreja da Sagrada Família em Barcelona (LEON, 1994), por Pier Luigi Nervi no projeto do Palácio do Trabalho de Torino, por Frei Otto em uma construção na Arábia Saudita (RAMOS, 1993) e na construção das estrutura internas do aeroporto de Stuttgart (VINCENT, 1997).

Como até certo ponto da pesquisa não se conhecia nenhuma aplicação do estudo da estrutura das árvores em peças mecânicas, este parecia ser um caminho

promissor para fornecer subsídios para o aprimoramento das máquinas ferramenta em particular.

Foi iniciado um levantamento fotográfico de árvores na região de São Carlos (SP), conforme ilustra a Figura 3.2, com a finalidade de melhor observar as formas da natureza que resistem aos esforços se adaptando às condições locais.

Figura 3.2 – Árvore da espécie *Eucalyptus sp* localizada na região de São Carlos (Distrito Industrial). As setas mostram as formas que podem ser estudadas.



Nos exemplares fotografados pensava-se em imitar e verificar as tensões e a resistência das formas das uniões dos galhos no tronco (indicadas na Figura 3.2 por setas) com o objetivo de se obter princípios de projeto para melhorar as uniões da mesa e do cabeçote com a coluna da fresadora da Figura 3.1 (também indicadas por setas). Estas verificações seriam executadas através de cálculos clássicos de resistência dos materiais e também através de programas que utilizam o método dos elementos finitos.

Durante a pesquisa bibliográfica, verificou-se que já existiam alguns estudos sobre a resistência mecânica das árvores (WILSON, 1979), sobre a união do espinho ao caule nas roseiras (MUNARI, 1978 e CARON, 1988) e também que as curvas encontradas nas juntas naturais de diversas espécies vegetais e animais se assemelham, e muito conforme exemplifica a Figura 3.3, àquelas encontradas experimentalmente em 1934 pelo pesquisador alemão R. Baud em

seus estudos sobre a concentração de tensões em juntas “T” para vigas planas submetidas à ensaios de flexão (MATTHECK, 1990).

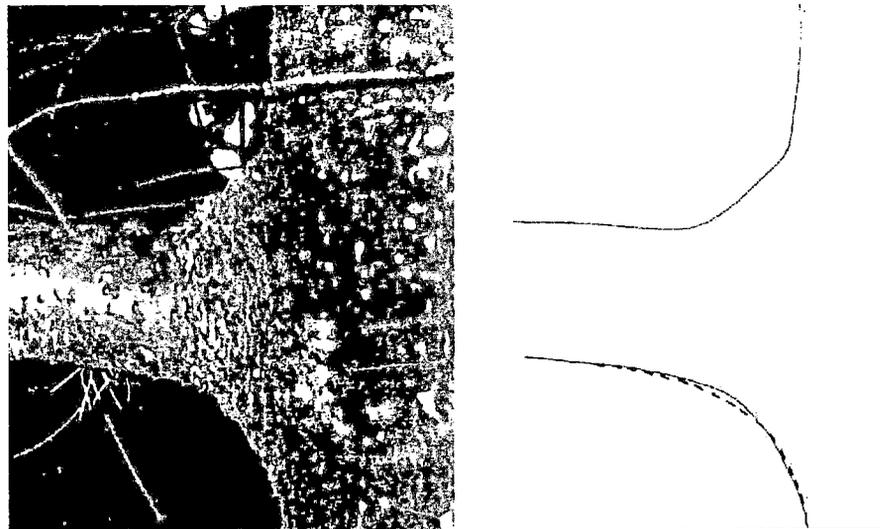


Figura 3.3 – Lado esquerdo: fotografia da união de um galho de árvore com o tronco. Lado direito: sobreposição das curvas naturais (___) e as curvas de Baud (----) (MATTHECK, 1990).

Em consulta à DUDUCH (1997), o mesmo observou que muitas estruturas da natureza incluindo aí as árvores, resistem não pela rigidez, uma das características buscadas em componentes mecânicos, especialmente em máquinas ferramenta, mas sim pela flexibilidade. Dessa maneira, pensou-se também em estudar estruturas naturais rígidas como os materiais cristalinos. PEARCE (1990) faz um estudo teórico extenso sobre as formações celulares e cristalinas encontradas na natureza e o aplica à arquitetura, enquanto COSTA E SÁ (1982) desenvolve um estudo sobre estruturas cristalinas e poliedros regulares com aplicações mais genéricas.

Proseguindo com a pesquisa, verificou-se que o relacionamento de estruturas de árvores com componentes mecânicos já havia sido explorado em profundidade e com êxito, desde aproximadamente 1985, no Instituto de Pesquisas de Materiais do Centro de Pesquisas de Karlsruhe (Alemanha) por MATTHECK (1991) (ver Anexo A).

Dessa maneira, foi reiniciada a busca de um tema inédito para o desenvolvimento de uma tese de doutoramento.

3.1.1 – Definição do Estudo de Estruturas Resistentes ao Impacto e Hipótese de Trabalho.

Durante as pesquisas anteriormente expostas, foi notada uma observação de (BAUMGARTNER et al, 1992) com relação ao método de otimização denominado de CAO / SKO, que segue:

“This optimization procedure works well only for static or quasi-static loading. In this state it is not useful for impact conditions, but it is recommended for the improvement of fatigue resistance and for minimizing weight in all other load situations”.

Ou seja, todos os estudos encaminhados para melhorar o desempenho de peças submetidas à fadiga, utilizando simulações do crescimento adaptativo de árvores e simulações da mineralização adaptativa de ossos podem ser utilizados com sucesso para carregamentos estáticos ou quase estáticos, sendo que os resultados da aplicação destes procedimentos não são recomendados para condições de impacto

Viu-se então uma oportunidade para a realização do procurado estudo inédito, que poderia ser de valia não somente para máquinas ferramenta como também para outras estruturas que são submetidas e/ou devem suportar impactos.

Consultando o material já disponível e após nova pesquisa bibliográfica, além da bibliografia básica (TIPLER, 1994 e 1978) até o momento nada foi encontrado sobre o comportamento ao choque de estruturas macroscópicas genéricas, nem sobre a configuração externa de peças para a resistência ao impacto nem sobre a imitação de estruturas resistentes ao impacto mas sim estudos aplicados a peças e materiais específicos como carrocerias (parte deformável e habitáculo) de automóveis (<http://www.fia.org>) e os desenvolvidos

por (CANTWELL & MORTON, 1991; ADAMS, 1967, LONBORG, 1967 e JOHNSON, 1967).

Também foram encontrados diversos estudos sobre a resistência ao impacto e à fratura de materiais naturais tais como a concha de moluscos (BBC, 1993 e SRINAVASAN, 1996a e 1996b), madeira (VINCENT, 1996 e 1994), tecidos orgânicos e chifres (JERONIMIDIS & ATKINS, 1995), concha do abalone, dentes de roedores e exoesqueleto de insetos, (AMATO 1991 e GUNDERSON & WHITNEY, 1992) e também ossos (VINCENT, 1997).

Estes estudos estão ligados a um dos principais campos de atuação da Biomimética que é o desenvolvimento de novos materiais com base no comportamento microscópico de materiais naturais. Estes novos materiais em desenvolvimento são invariavelmente compostos (*composites*) e sendo o osso que iremos estudar um material também considerado composto, serão de grande valia no entendimento do modo e dos mecanismos de fratura.

3.2 - Busca de Estruturas Naturais Resistentes ao Impacto.

Dentre as possíveis estruturas que poderiam servir de base para o estudo, através de consultas à especialistas, levantamentos bibliográficos, levantamentos na internet e de material coletado ao longo do tempo, foram enumeradas as seguintes:

- 1 - Garra modificada de uma espécie de crustáceo oceânico proveniente da região tropical da Malásia ou Indonésia, constituída por um material do tipo cerâmico e que é usada como arma. (BBC, 1993 e DIAS, 1997).
- 2 - Crânio de uma espécie de bode alpino que é usado como arma de ataque / defesa através de impactos com o crânio do oponente (BBC, 1993)
- 3 - Bico em conjunto com a cabeça de Pica Pau que é usado como ferramenta na escavação de troncos de árvores à procura de larvas (DIAS, 1997)

- 4 - Crânios de Búfalos que são usados como arma de ataque / defesa (JORGE, 1998 e ALBIM, 1996).
- 5 - Asas de Grilos, modificadas para a emissão de sons (MELLO, 1998 e WALKER, 1975).
- 6 - Crânios de carneiros que são usados como arma de ataque / defesa (RUFFINO, 1998 e SIQUEIRA, 1998)

Dentre todas as possibilidades, e após diversas consultas telefônicas, obtiveram-se duas possibilidades factíveis: O estudo do crânio de búfalos ou o estudo do crânio de carneiros. Optou-se pelo estudo do crânio de carneiros pois este caminho parecia ser mais exequível devido ao grande número de locais onde é feita esta criação com diversas finalidades e também devido à proximidade geográfica destes locais.

3.2.1 - A Hipótese.

O osso é um material composto, característica devida nem tanto à variação da composição química através do material mas principalmente pelo variação no arranjo físico microscópico e macroscópico das substâncias químicas em diferentes porções do material. Ele é naturalmente resistente a diversos tipos de tensões, incluindo as de tração, compressão, flexão e também impacto.

Uma das premissas na qual se baseia este estudo é que embora todos os crânios de animais sejam feitos do mesmo tipo de material, existem grandes diferenças quanto ao desempenho e às propriedades mecânicas dos ossos de diversos animais (AERSSSENS et al, 1998).

O que se pretende demonstrar neste trabalho é que o crânio do carneiro resiste a impactos não somente pelas melhores propriedades mecânicas do osso com o qual é constituído, conforme demonstrado por (AERSSSENS, 1998), mas também e principalmente pela forma macroscópica como este material é disposto ao longo da estrutura do crânio do carneiro, já que o crânio dos bovinos é constituído de um material com características mecânicas similares mas, justamente pela forma, não é tão resistente a impactos como os crânios de

carneiros pois na natureza ambos podem lutar dando cabeçadas (na verdade é o carneiro que ataca os bovinos quando dividem e disputam o mesmo território) com conhecidos prejuízos para os bovinos, sendo que uma cabeçada bem colocada por um carneiro pode até derrubar um bovino.

4 – LEVANTAMENTOS DE DADOS.

4.1 – Levantamento de Campo para Obter Exemplares de Crânios.

Definido o objeto de estudo foram buscadas formas de obter crânios de carneiros. Como já havia um contato prévio com o Prof. Dr. Edson Ramos de Siqueira do setor de ovinocultura do Departamento de Produção e Exploração Animal da FMVZ da Unesp campus de Botucatu, ele foi novamente procurado e então ocorreu uma coincidência:

Os ovinos da espécie *Ovis aries* que lutam utilizando a cabeça para impactar a cabeça do oponente, e que por isso tem esta arma melhor desenvolvida são machos adultos. Ocorre que em geral os machos são abatidos ainda cordeiros com a finalidade de fornecer carne para consumo humano, sendo difícil o abate de machos adultos. Como na época (1º semestre de 1998) o setor de ovinocultura havia adquirido novos reprodutores vindos do Estado do Rio Grande do Sul para renovar e melhorar seu rebanho, ocorreu um excesso de machos e 3 deles da raça inglesa *Romney Marsh* deveriam ser abatidos, todos com de 3 a 3,5 anos de idade, o que corresponde à sua idade adulta.

Estes animais foram abatidos e suas cabeças levadas para o Departamento de Anatomia Comparada do Instituto de Biociências da Unesp, campus de Botucatu que na pessoa do Prof. Dr. Joffre Guazelli Filho providenciou a limpeza destas através da técnica do maceramento que consiste numa limpeza prévia do material anatômico, seguida do cozimento em água por várias horas do material que ainda restar na peça ou que for difícil de ser retirado. Após isso é feita nova limpeza manual e o material é tratado com água oxigenada e deixado ao sol para branqueamento.

4.2 – Material Obtido.

4.2.1 – Crânios

Como resultado foram obtidos 3 crânios de ovinos machos adultos, com idade de 3,5 anos da espécie *Ovis aries* e da raça inglesa *Romney Marsh* mostrados nas Figuras de 4.1 à 4.8 abaixo

Figura 4.1 –
Crânio 1: vista de
perfil.

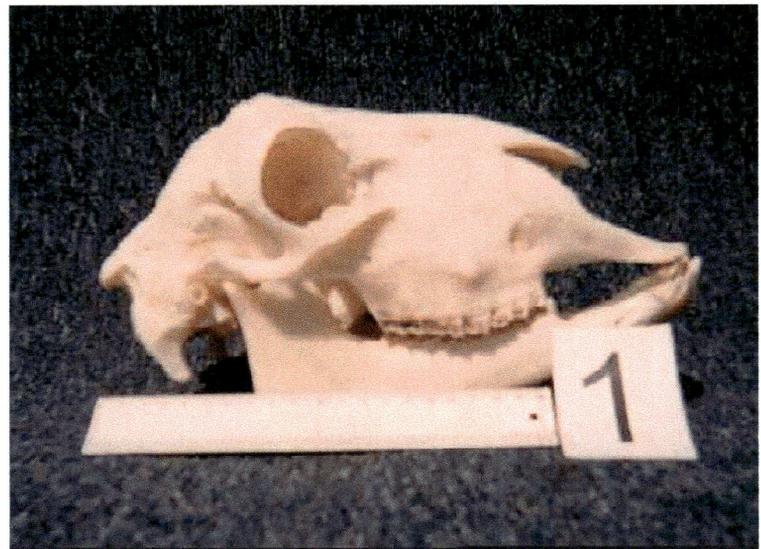


Figura 4.2 – Crânio 1: vista
frontal.



Figura 4.3 –
Crânio 1: vista
posterior.

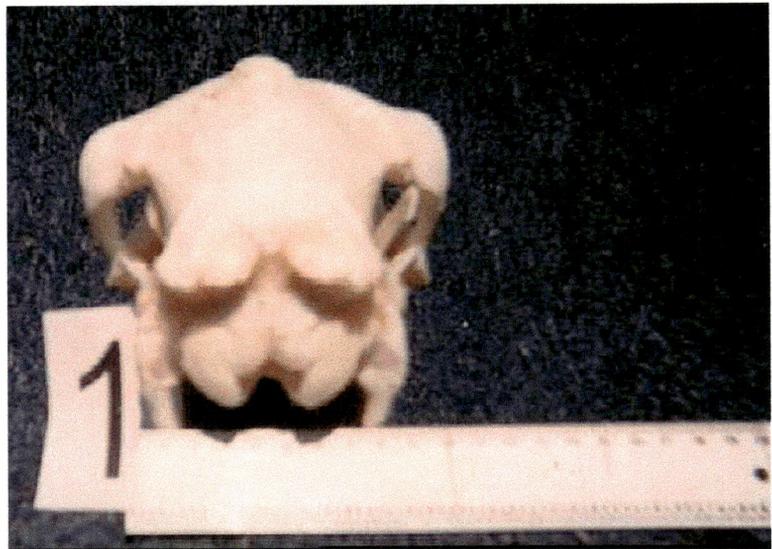


Figura 4.4 –
Crânio 1: vista de
perfil com as
vértebras
cervicais
acopladas.

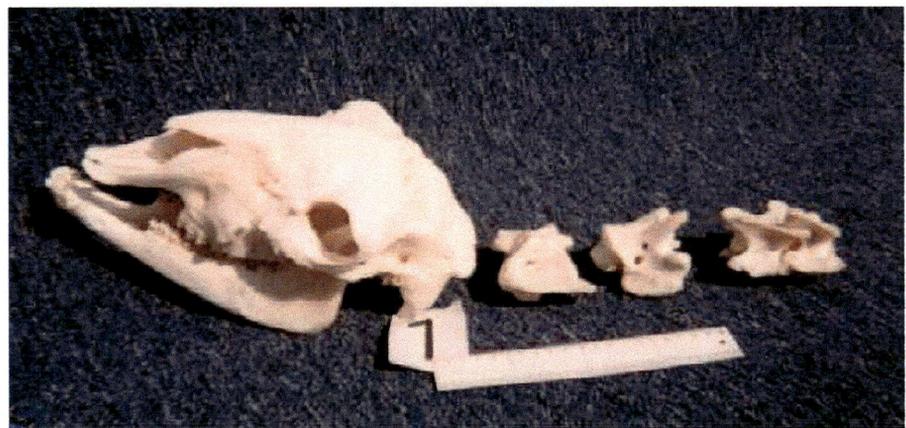
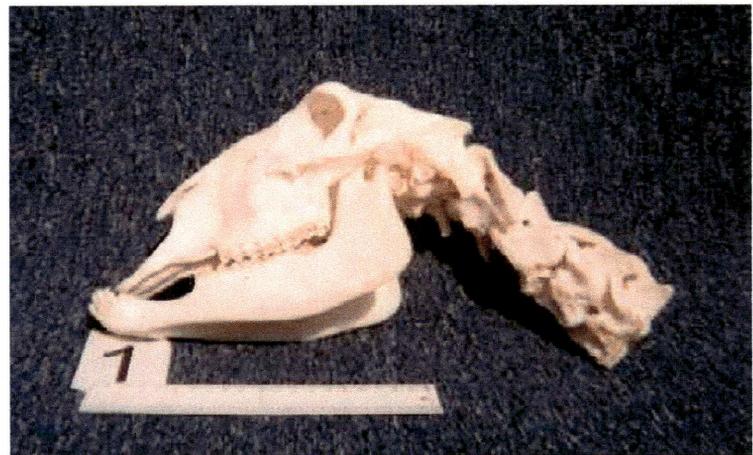


Figura 4.5 – Crânio 1: vista com as vértebras cervicais não acopladas

Figura 4.6 –
Crânio 2: vista de
perfil.



Figura 4.7
– Crânio 2:
vista
posterior.

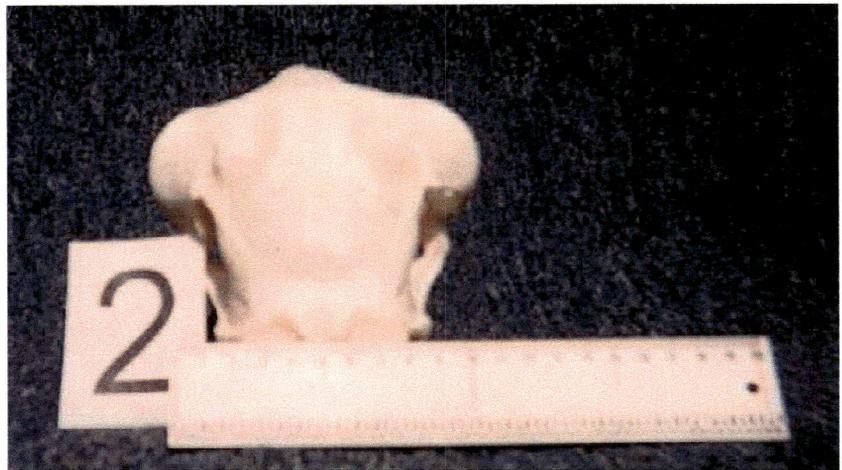


Figura 4.8 – Crânio 3:
vista em perspectiva.



4.2.2 – Filmagem em Vídeo

O comportamento do Animal:

Antes de falar das filmagens propriamente ditas, é preciso compreender o comportamento do animal. Existem vários aspectos ligados ao comportamento do animal em estudo, mas o que mais interessa é aquele ligado à luta. Esses animais lutam para disputar a liderança do grupo e ter privilégios na alimentação e no acasalamento.

A luta é um ritual da raça, sendo que os contendores inicialmente se aproximam com agressões de menor intensidade em diversas partes do corpo. Após isso se posicionam frente a frente de modo a “encarar” o adversário e então lentamente se afastam caminhando de ré até que seja atingida uma distância de 2 a 8 metros (Figura 4.9).

Neste ponto ambos iniciam uma aproximação rápida em direção ao adversário e próximo do impacto elevam seus corpos, abaixam a cabeça e alinhando as atingem o oponente.

É interessante notar que “as regras da luta” são bem definidas e o ritual é sempre o mesmo, garantindo que o impacto virá sempre de uma mesma direção e sentido e ocorrerá sempre na mesma região do corpo, ou seja a cabeça e mais particularmente na porção posterior do crânio na região do osso parietal que é descrito pela literatura como sendo mais espesso e de forma adequada para receber tal solicitação (GETTY, 1981 e MAY, 1964)

Abaixo desta porção do crânio se encontra o cérebro do animal que não deve sofrer danos. Se o impacto for muito intenso devido a grandes diferenças de massa entre os animais, pode ocorrer a morte do mais fraco não pelo rompimento do crânio, mas sim por complicações respiratórias, o mesmo ocorrendo se o impacto for desferido em outra região. O golpe também pode resvalar no crânio do oponente atingindo partes do peito do animal, principalmente a palheta que pode se fraturar ou ser machucada.

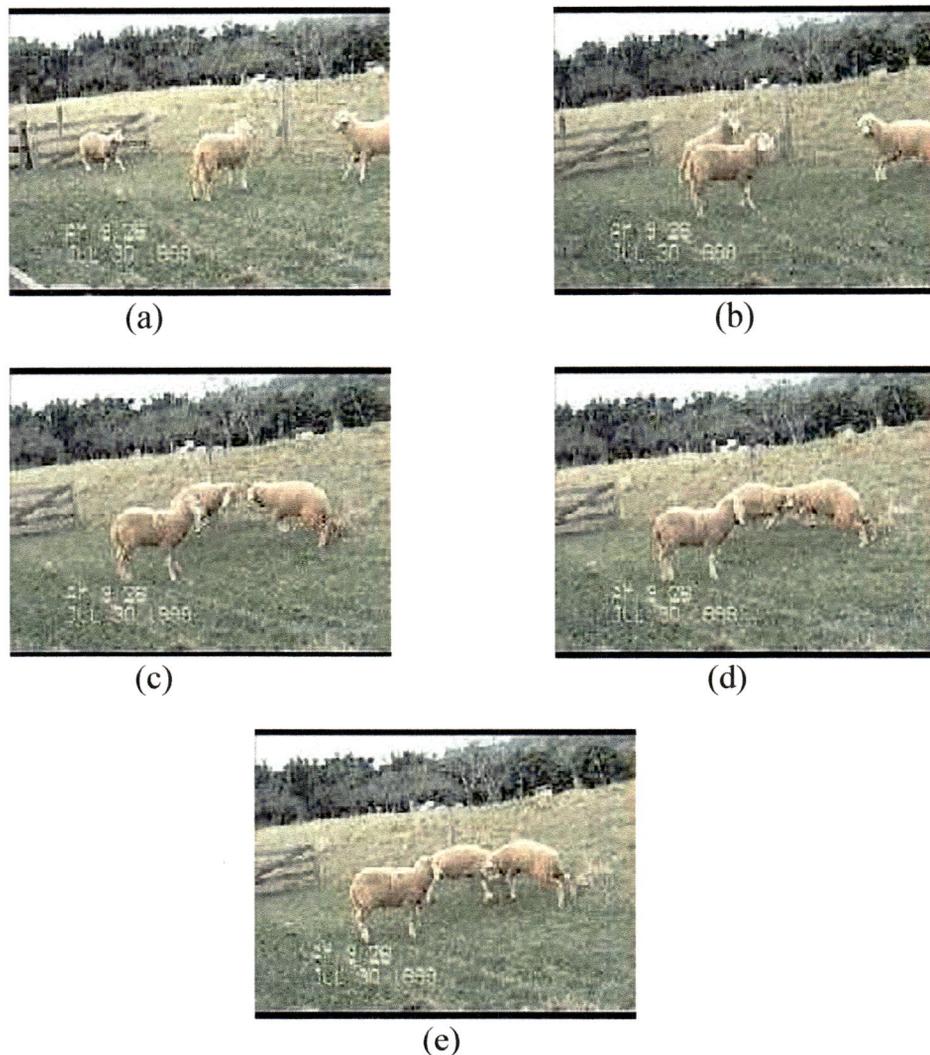


Figura 4.9 – Sequência mostrando parte das filmagens. a) distância máxima. b) meia distância. c) momentos antes do impacto. d) impacto. e) pós impacto.

As filmagens em vídeo:

Em dois dias (23/07/98 e 30/07/98) foram feitas 2 horas de filmagens em vídeo na área de produção de ovinos da FMVZ da Unesp de Botucatu, localizada na Fazenda Edgardia, no mesmo município.

Para que fosse possível colher as imagens que interessavam, os animais ficaram separados por um período de alguns dias para que fosse perdida a hierarquia do grupo e portanto houvesse luta. Após as lutas a hierarquia é

rapidamente redefinida e os oponentes não lutam mais.

Do total filmado, são aproveitáveis aproximadamente 12 minutos de vídeo, contendo imagens das lutas entre os animais e da pesagem dos mesmos.

Para estas filmagens foi utilizada uma filmadora marca “Panasonic”, modelo semi profissional com zoom. A luz utilizada foi a do sol e realizada em dia com boas condições de iluminação.

Estas filmagens tinham por propósito inicial determinar a região do crânio que estes animais usam para o impacto mas como será visto adiante serviram também para a determinação das velocidades de aproximação momentos antes dos impactos e a duração do impacto.

4.3 – Determinação das Condições do Impacto

4.3.1 – Tipo do impacto, ponto de impacto, direção e sentido da força e características da região impactada.

Tipo de impacto

Conforme pode-se observar pela seqüência da figura 4.9, e principalmente as duas últimas, o choque não é nem elástico, nem inelástico, pois parte da energia é absorvida pelos animais na luta e parte faz com que o carneiro continue seu movimento

Para ter idéia da energia residual será necessário medir as velocidades de translação e rotação do corpo dos carneiros após o impacto e associá-la com a energia envolvida

Ponto de Impacto

Conforme se pode observar pela Figura 4.10, o ponto de impacto é na parte posterior do crânio. Mais precisamente e segundo (GETTY, 1981 e MAY, 1964) o impacto se dá nos ossos parietais.





Figura 4.10 – Ponto de Impacto durante a luta. À direita um detalhe ampliado da figura da esquerda.

Ainda conforme (GETTY, 1981):

“Ossos Parietais são em número de dois, separados por uma sutura e pelo osso interparietal. A parte lateral destes é convexa externamente quando comparada com a concavidade desta parte no boi.

A espessura da parte dorsal do osso é maior do que aquela do cavalo e é aumentada no carneiro, para proteção do cérebro, porque a cabeça é usada como uma arma de ataque. Externamente, as faces dorsal e lateral de cada osso são separadas por uma ligeira crista, a crista sagital externa (parietal), que se estende das proximidades da extremidade lateral da linha nugal em um arco para juntar-se à crista temporal (frontal).

O desenvolvimento desta crista é extremamente variável; geralmente é difícil distingui-la rostralmente e pode, em alguns indivíduos, ser substituída por um sulco na região rostral. As faces dorsais são lisas e convexas transversalmente e mostram somente leves impressões girais sobre a face interna.”

MAY (1964) fornece informações adicionais sobre crânios de carneiros:

“Os ossos parietais (*Ossa parietalia*) forma pelo menos um terço do teto e das paredes laterais da cavidade craniana. ... A parte lateral é externamente convexa se comparadas com as do boi. A espessura da parte dorsal do osso é maior que aquela do cavalo e mais espessa ainda no macho para a proteção do cérebro pois a cabeça é usada como arma de ataque.”

A partir da Figura anterior e da representação de um esqueleto completo do carneiro (GETTY, 1981), foi montada através da manipulação em programas de computador e de colagens a Figura 4.11 abaixo.

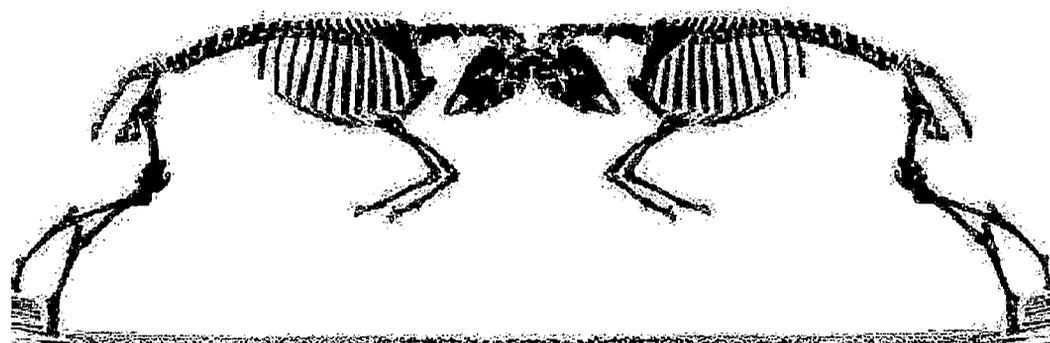


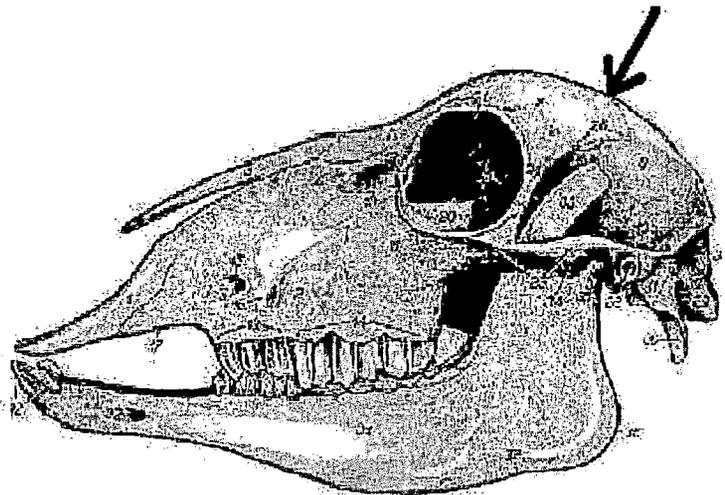
Figura 4.11 – Representação esquemática através dos esqueletos da posição dos corpos dos carneiros e do ponto de impacto. (modificado de GETTY, 1981)

Pode-se notar que o ponto da colisão não está alinhado com a coluna cervical, mas o “queixo” do animal está justaposto ao seu pescoço e estruturas adjacentes, de onde pode-se supor que a menos de um amortecimento proporcionado pelos tecidos da interação queixo - pescoço e pelas cartilagens da coluna cervical, o conjunto é compacto, com o ponto do impacto na região central, como a cabeça de um aríete. Dessa maneira, a energia do impacto é descarregada tanto nas vértebras cervicais / cartilagens quanto nos tecidos / músculos do pescoço.

Direção e sentido da força

A Figura 4.12 mostra o osso parietal e uma provável direção para a força de impacto.

Figura 4.12 –
Ilustração do crânio
de um carneiro. A
seta aponta para o
osso parietal
mostrando a região
do impacto e a
provável direção da
força de impacto.
(POPESKO, 1975)



Características da região impactada.

A região que sofre o impacto se caracteriza por ter um espessamento do tecido ósseo, conforme mostram as Figuras 4.13 e 4.14.

Analisando as estas duas Figuras pode-se notar que as estruturas adjacentes aos ossos parietal, interparietal, occipital e frontal protegem a cavidade do cérebro bem como outras cavidades (sinus) que formam uma estrutura complexa vazada por onde podem se propagar as tensões do impacto.

4.3.2 – Quantidade de Movimento, duração do impacto, impulso e intensidade das forças média e máxima.

Física básica sobre impacto

Impulso (TIPLER, 1978).

Quando um corpo colide com outro, a força entre eles no instante em que começa o contato é zero.

Figura 4.13 – Corte longitudinal do crânio de um carneiro. A seta aponta para o osso parietal mostrando a região do impacto e a provável direção.

(POPESKO, 1975)

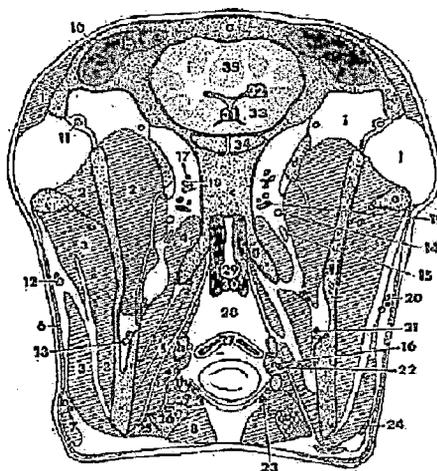
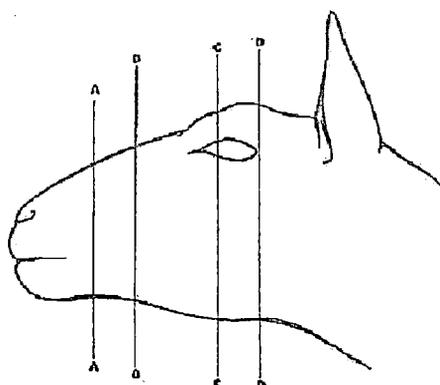
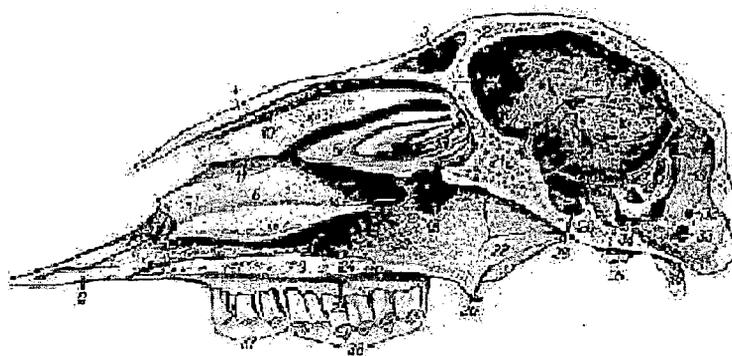
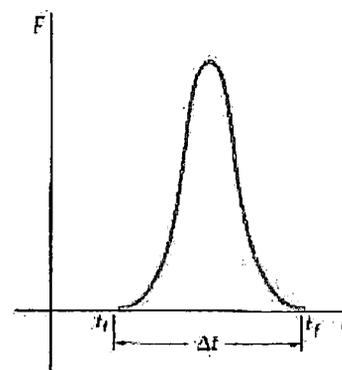


Figura 4.14 – Corte transversal D-D da cabeça de um carneiro em uma região anterior à que sofre o impacto. (MAY, 1964)

A força, então, cresce até um valor muito grande e finalmente decresce até zero quando os corpos perdem o contato, sendo que o tempo de duração do contato é muito pequeno (Figura 4.15).

As grandezas que terão interesse neste trabalho são as velocidades v_i e v_f , respectivamente inicial e final do carneiro e suas quantidades de movimento $p_i = m.v_i$ e $p_f = m.v_f$ instantes antes e após o contato respectivamente. Estas grandezas estão relacionadas com o impulso I da força F no intervalo de tempo Δt . O vetor impulso é definido por:

Figura 4.15 – Força exercida por um corpo sobre outro durante uma colisão em função do tempo. (TIPLER, 1978)



$$I = \int_{t_i}^{t_f} F dt$$

O valor do impulso é medido pela área sob a curva de F contra t . Admitindo que F seja a força resultante, e utilizando a lei de Newton, $F = dp/dt$, vê-se que o impulso é igual à variação da quantidade de movimento durante um intervalo finito de tempo.

$$I = \int_{t_i}^{t_f} F dt = \int_{t_i}^{t_f} \frac{dp}{dt} dt = pf - pi = \Delta p$$

A equação acima mostra que as unidades do impulso são o newton-segundo ou o quilograma-metro por segundo.

Quando F é uma força qualquer, as equações do impulso (acima) mostram que ele depende dos tempos t_i e t_f . As forças que atuam nas colisões, no entanto são nulas, exceto num pequeno intervalo de tempo, conforme a Figura 4.15. Para estas forças, o impulso não depende do intervalo de tempo, desde que t_i seja um instante anterior à colisão e t_f um instante posterior ao seu término.

Quando dois corpos se aproximam com determinada velocidade, colidem e param, a variação da quantidade de movimento é igual à quantidade de movimento inicial:

$$\Delta p = I = p_i$$

O impulso que o corpo A exerce sobre o B é igual em grandeza e de direção oposta ao impulso que B exerce sobre A, pois as forças, de acordo com a terceira lei de Newton, são iguais e opostas.

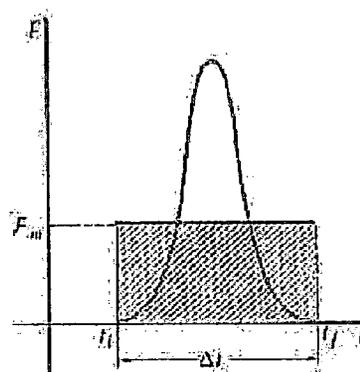
Média temporal de uma força (TIPLER, 1978).

A média temporal de uma força é definida sobre um intervalo de tempo $\Delta t = t_f - t_i$ e é definida por

$$F_m = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_i}^{t_f} F dt = \frac{I}{\Delta t}$$

Onde F_m é a força constante que provoca o mesmo impulso no intervalo de tempo Δt . A F_m está indicada na figura 4.16. É muitas vezes útil calcular a força média (como se diz habitualmente) numa colisão, para fazer a comparação com outras forças, como o atrito ou gravitacionais. Chegar-se-á à conclusão de que ela é muito maior.

Figura 4.16 – A força média num intervalo de tempo, é a força constante que imprime o mesmo impulso que a força real, no mesmo intervalo. A área retangular $F_m \cdot \Delta t$ é igual à área subentendida pela curva F contra t



Aproximação do Impulso (TIPLER, 1978).

Em muitas colisões, a força média que um corpo exerce sobre o outro é muito grande, e o tempo de colisão muito pequeno. Pode-se, então desprezar outras forças que atuam sobre os corpos e admitir, com boa aproximação, que a quantidade de movimento do sistema formado pelos dois corpos se mantém constante durante a colisão. Sendo Δt suficientemente pequeno, pode-se também

desprezar o movimento dos corpos durante o evento. Esta aproximação F_m muito maior que qualquer outra força e Δt muito pequeno, de modo a não haver praticamente movimento durante a colisão é chamada de *aproximação do impulso*.

Coefficiente de Restituição (TIPLER, 1978).

Em geral, as colisões dos corpos macroscópicos não são nem perfeitamente elásticas, nem perfeitamente inelásticas. Parte da energia inicial do movimento relativo ao centro de massa é dissipada. Para este estudo, será considerada que a colisão é perfeitamente inelástica, ou seja, toda a energia do movimento relativo ao centro de massa é dissipada, o que implica que no referencial de quantidade de movimento (momento) nula, os corpos ficam juntos, sem energia cinética. Neste caso, no referencial de campo, será suposto que os corpos não se movem juntos, o que ocorre parcialmente na realidade pois grande parte da energia do impacto é absorvida pelos tecidos e músculos do pescoço e uma pequena parte ainda confere movimento aos corpos. Neste caso, embora o coeficiente de restituição ϵ esteja entre 0 e 1, mais próximo de 0, ele será considerado 0 (zero), ou seja choque perfeitamente inelástico.

Aplicação dos conceitos da física ao problema da colisão entre carneiros.

Com o objetivo de determinar as forças média e máxima atuantes na colisão entre os carneiros e de acordo com as equações acima, primeiramente serão determinadas a massa e a velocidade de aproximação dos animais, obtendo com isto o impulso e este, composto com o tempo do impacto dará a força média.

Houveram diversas lutas durante as filmagens. Neste trabalho será abordada uma dessas lutas, justamente aquela que foi julgada a mais representativa das condições normais de impacto.

Os animais que lutaram são da mesma espécie (*Ovis áries*) mas de raças diferentes as lutas foram referenciadas pela raça e no caso em estudo será chamada: Romney Marsh x Bergamácia.

Determinação das massas.

As massas dos animais foram obtidas durante as filmagens através da pesagem dos mesmos em uma balança adaptada para tal no setor de produção de ovinos da FMVZ da Unesp de Botucatu.

As figuras 4.17 e 4.18 mostram respectivamente a pesagem dos carneiros das raças Romney Marsh e Bergamácia.

Os crânios disponíveis e mostrados nas figura 4.1 a 4.8 são da raça Romney Marsh.

Figura 4.17 – Pesagem do
carneiro da raça Romney
Marsh



Figura 4.18 – Pesagem do
carneiro da raça
Bergamácia.



As massas obtidas para estes dois animais foram $m_r = 79$ Kg para o Romney Marsh e $m_b = 53$ Kg para o Bergamácia.

Determinação das dimensões dos animais e velocidades de aproximação.

Como se dispõe das imagens em vídeo das lutas, para a determinação da velocidade antes do impacto, na realidade será medida a velocidade média desde alguns segundos antes da colisão. Para isso, é necessário obter o espaço percorrido e medir o tempo decorrido.

A medição do espaço foi feita por comparação com as dimensões do corpo do animal. As dimensões do corpo do animal também foram feitas por comparação com as dimensões conhecidas da gaiola de pesagem. O tempo foi medido através do relógio de um aparelho de vídeo marca Sanyo modelo VHR 9404 e de um cronômetro.

Para a medição por comparação do corpo do animal foi utilizado o exemplar da raça Bergamácia e mostrado na Figura 4.18. A comparação foi feita com as dimensões da gaiola de pesagem mostrada na Figura 4.19. O resultado é mostrado no esquema da Figura 4.20.

Figura 4.19
- Dimensões
da gaiola
para
pesagem.

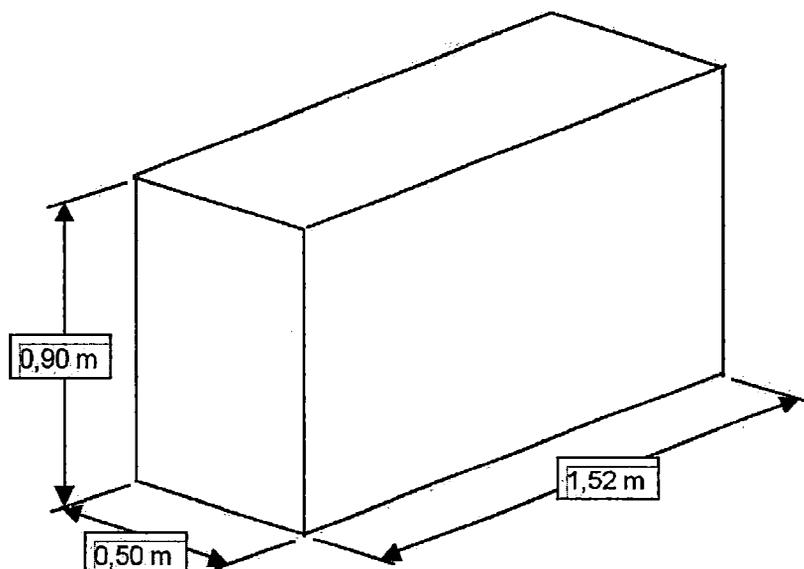
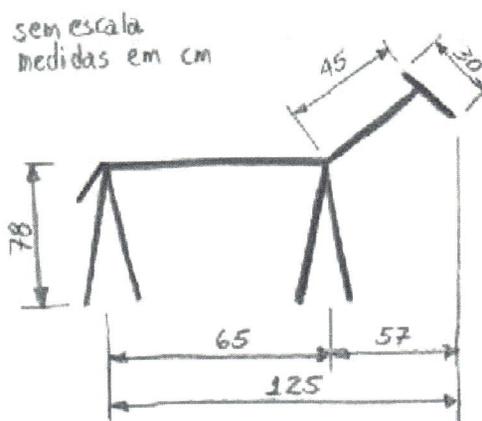


Figura 4.20 – Esquema com as dimensões do carneiro da raça Bergamácia.



Da Figura 4.20, foi utilizada a dimensão 0,65 m do corpo do carneiro para obter a distância entre os animais de 2,38 m (Figura 4.21 a).

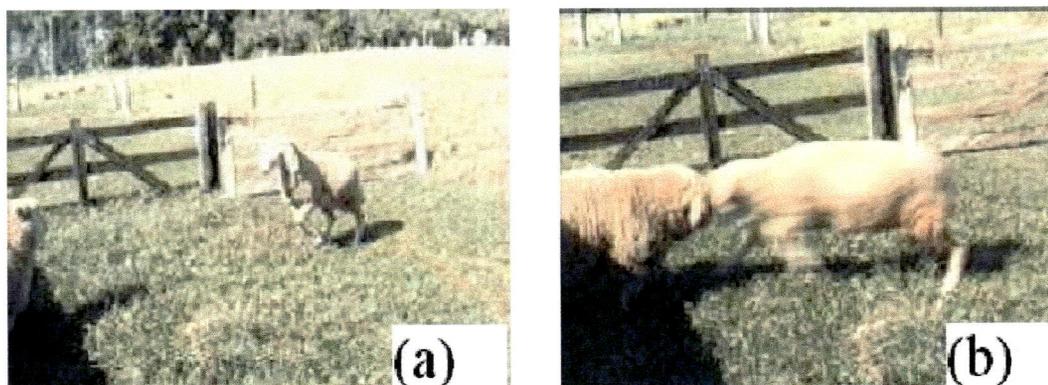


Figura 4.21 – a) Determinação da distância entre os animais. e b)

Determinação do intervalo de tempo.

Para a medição do tempo utilizou-se o vídeo citado acima acionado no modo câmara lenta e um relógio-cronômetro da marca Casio modelo 181W25. Como o tempo cronometrado no modo câmara lenta não corresponde ao real, obteve-se uma relação de conversão que para os aparelhos utilizados era de 1,0 s de tempo real para cada 15,0 s do tempo medido durante a câmara lenta.

Com o vídeo no modo câmara lenta, mediu-se com o cronometro o tempo da imagem congelada da Figura 4.21a até o momento do impacto (Figura 4.21b).

O tempo medido no cronometro foi de 4,75s que dividido por 15 resulta em 0,32s.

Portanto, a velocidade pode ser calculada:

$$v = \Delta S / \Delta t \rightarrow v = 2,38 / 0,32 \rightarrow v = 7,44 \text{ m/s} \rightarrow v = 26,8 \text{ Km/h}$$

Durante a busca por artigos referentes ao assunto de impacto na natureza, foi encontrado um estudo sobre o impacto de espécies de carneiros com chifres (KITCHENER, 1988). O autor fez a análise de diversas filmagens de lutas de carneiros com chifre a fim de determinar as variáveis envolvidas nos impactos. O interesse deste autor foi o de determinar as condições desses impactos (velocidades de aproximação, forças, quantidades de movimento, energias e fatores de segurança envolvidos) nos nos chifres dos animais já que a forma e principalmente o material desta parte do animal tem grande interesse para o desenvolvimento de materiais compostos. No caso da velocidade de aproximação, os valores máximos encontrados nesse estudo são da ordem de 5,6m/s ou 25% menor que a encontrada no presente trabalho. Esta diferença pode ser em parte creditada aos meios materiais utilizados por aquele autor, bem mais sofisticados (mesmo para a época) que os utilizados no presente trabalho. De qualquer modo, o presente estudo terá prosseguimento com o valor de velocidade média encontrado (7,44m/s) mesmo porque existem referências mostrando que animais de outras espécies atingem velocidades bem maiores que a encontrada. No caso de bois almiscarados das estepes da ásia, esta velocidade de aproximação pode chegar a 22m/s ou 80Km/h! (BBC, 1993).

Determinação do impulso.

Com os dados acima obtidos e utilizando a massa do carneiro da raça Bergamácia, o Impulso pode ser calculado:

$$I = m.v \rightarrow I = 53 . 7,44 \rightarrow I = 394,3 \text{ N.s}$$

Existem erros envolvidos neste processo de obtenção das dimensões. Primeiramente os inerentes ao equipamento de medição utilizados, depois a imprecisão na determinação das posições dos animais e também erros devido à paralaxe embutidos tanto na determinação das dimensões dos carneiros por comparação com as dimensões das grades da balança quanto da distância entre os carneiros. É difícil estimar estes erros, mas procurou-se minimizá-los escolhendo fotos onde a grandeza a ser medida e sua referência estivessem no mesmo plano.

Determinação do tempo da colisão.

Segundo (TIPLER, 1978), de acordo com o princípio da conservação de energia, a energia de um fenômeno pode ser dissipada sob a forma de calor, som ou sob outras formas (potencial ou mecânica por exemplo). No caso em estudo tem-se que a energia cinética dos carneiros, supondo uma colisão inelástica é dissipada na forma de atrito, calor no amortecimento que se dá nos músculos do pescoço do animal e na forma de som. Esta última forma de dissipação vai ser particularmente interessante pois através dessa manifestação pôde-se estimar a duração do impacto.

O ruído do choque dos crânios dos carneiros pode ser ouvido à distâncias variáveis, sendo que da posição de onde foram feitas as filmagens, em torno de 5,0m, estes eram perfeitamente audíveis. Ora se assemelhavam a um côco verde caindo no chão, ora era um ruído mais “seco” como a colisão de duas cascas secas de côco.

Os sons dos impactos gravados foram capturados através do acoplamento de um “vídeo cassete recorder” com um microcomputador com placa de som “Sound Blaster”®. A captura do som foi feita de duas maneiras: através de um microfone colocado em frente ao alto falante do aparelho de televisão e acoplado à placa de som e através de um cabo de áudio ligando diretamente o reproduzidor de vídeos com a placa de som (Figura 4.22). Os sons foram gravados no modo mono com qualidade de CD (“compact disc”).



Figura 4.22 – Montagem para a captura dos sons do impacto.

Os sons gravados através do cabo de áudio mostraram melhor qualidade e foram importados para o programa "Creative WaveStudio®" onde foram separados somente aqueles do impacto propriamente dito de modo a permitir a medição de seu tempo de duração.(Figura 4.23).

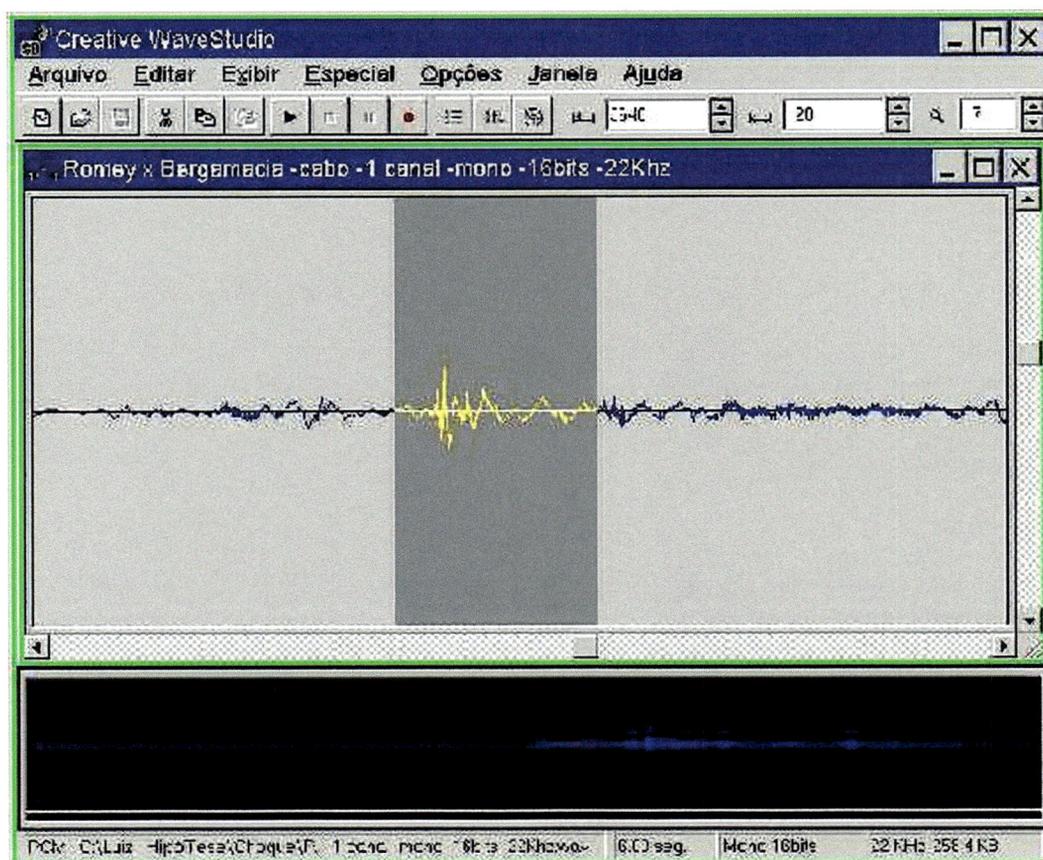


Figura 4.23 – Ondas sonoras gravadas, sendo que a parte cinza em destaque representa o momento do choque.

O valor obtido para a duração do impacto e fornecido pelo programa através da demarcação da região correspondente (em destaque na Figura 4.23) foi de 120 ms ou 0,12 s.

Determinação das forças média e máxima.

Com o valor do impulso e do tempo de duração da colisão, foi calculado o valor da força média.

$$F_m = I / \Delta t$$

$$F_m = 394,3 / 0,12$$

$$F_m = 3285,8 \text{ N}$$

Para se obter o valor da força máxima, o gráfico em destaque da Figura 4.23 foi importado para o programa AutoCAD®. Nele, utilizando “splines”, foi traçada a curva envoltória das ondas sonoras para a parte superior do gráfico, obtendo a Figura 4.24, cujo aspecto se assemelha às encontradas na literatura sobre as curvas típicas de forças de impacto em função do tempo.

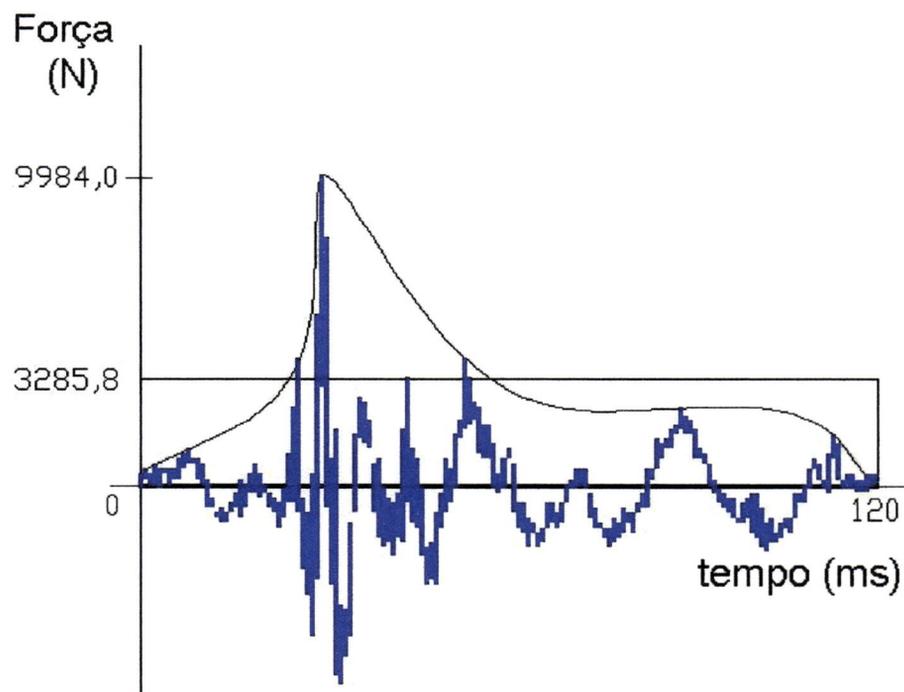


Figura 4.24 – Curva Fxt do impacto à partir das ondas sonoras.

Neste programa o gráfico importado ficou ligeiramente reduzido sendo que ao ponto 120 ms correspondeu 94,5 u, sendo u = unidade de comprimento arbitrária do AutoCAD®. Isto não representará problema pois o interesse recai na proporção entre as dimensões. Também através do programa AutoCAD® foi calculada a área sob a curva envoltória obtendo-se o valor de 1231,5 u².

Este valor dividido pelo comprimento obtido anteriormente (94,5 u) resultou em 13 u . Com este valor foi traçado o retângulo mostrado na Figura 4.24, que corresponde à força média calculada anteriormente cujo valor real é 3285,8 N

Medindo a altura máxima da envoltória obteve-se o valor de 39,5 u.

Sendo esse o valor relativo (em u) para o valor da força máxima, fazendo a proporção:

$$\frac{F_{máx.}}{3285,8} = \frac{39,5}{13} \Rightarrow F_{máx.} = 9984N$$

5 – DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DA GEOMETRIA ESPACIAL DE PARTE DO CRÂNIO ATRAVÉS DE ENSAIOS DE IMPACTO E DAS TENSÕES QUE NELE OCORREM EM SIMULAÇÕES ESTÁTICAS VIRTUAIS.

Para determinar o comportamento das tensões no crânio dos carneiros durante impactos, foram executados ensaios com os crânios naturais, com modelos de parte do crânio em resina de poliuretano derivada de óleo de mamona e através de simulações virtuais computadorizadas utilizando modelamento por elementos finitos de parte do crânio.

A maior parte desse estudos se limitou à parte superior do crânio do carneiro, mais precisamente a parte superior do crânio que recebe o impacto durante as lutas, na região do osso parietal. Não foram testadas ou modeladas as porções de tecidos que envolvem o crânio, nem as estruturas ósseas adjacentes nem a coluna cervical. É interessante notar que os tecidos que recobrem os ossos do crânio na região do impacto são de pequena espessura e com pouca lâ devido ao constante arrancamento, o que nos leva a crer que o teste com estes ossos será uma boa aproximação da realidade.

5.1 – Construção do Banco e da Base de Ensaios

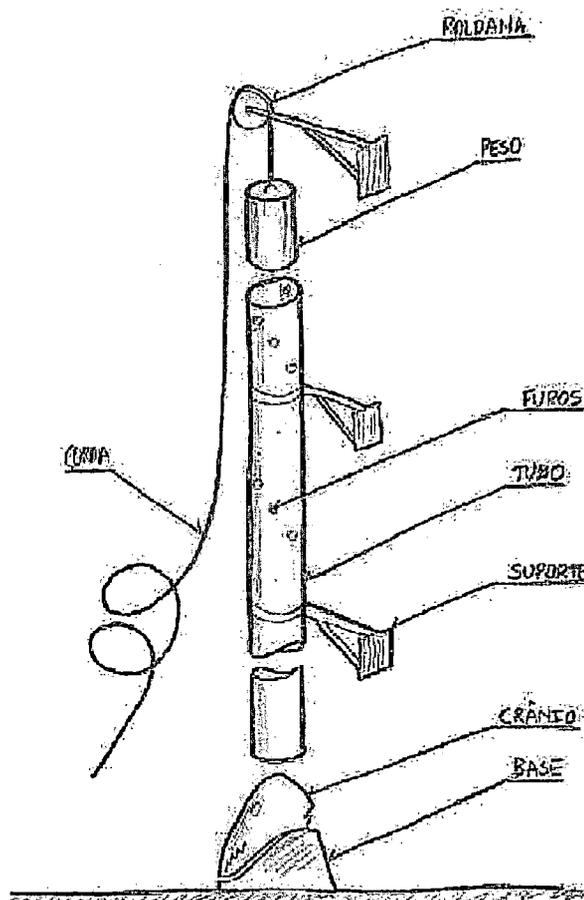
Cálculos preliminares:

Para a realização dos testes de impacto, foi construído um banco de ensaios baseado no esquema da (Figura 5.1). Optou-se por este tipo de banco de ensaio

por queda livre de um peso (*Drop Weight*) pois em consulta ZANETTI (1999) da empresa DINATEST, fabricantes de equipamentos para testes de impacto durante a feira “Brasilplast-99” foi relatado que para o caso em questão este seria o método usado com mais frequência. Também CANTWELL (1991) recomenda este tipo de aparelho para testes de impacto de baixa velocidade (até 10m/s), bem como para testes com geometrias complexas, característica do caso em estudo no presente trabalho.

Este dispositivo é constituído por um tubo disposto na direção vertical e fixado a uma parede através de suportes. Guiada pelo tubo, desliza uma massa de queda livre que é suspensa por um sistema de corda e roldana através do qual a massa pode ser posicionada em uma altura desejada e conhecida para depois ser solta em queda livre de modo que, ao atingir o corpo de prova, reproduza as condições da colisão entre os carneiros e correspondente com a energia e forças que se quer descarregar nos corpos de prova.

Figura 5.1 – Esquema do Banco de Ensaio a ser construído.



A determinação das dimensões deste banco de ensaios, foi baseada nos dados obtidos no campo quando das filmagens das lutas dos carneiros e posterior levantamento do impulso e das forças envolvidas no impacto (ver capítulo 4).

Com o valor do impulso, e através de algumas iterações iniciais foi pré estabelecido que seria utilizado um tubo de Cloreto de Polivinila (PVC) do tipo usado para redes de esgoto com diâmetro de 6 polegadas (150mm) e o comprimento utilizado seria o máximo disponível comercialmente ou seja, 6,0 m.

Para uma estimativa da massa de queda livre, primeiramente foi calculada a velocidade de um corpo em queda livre pelo princípio da conservação de energia. Se a altura de queda da parte inferior da massa for de 5,5 m, a velocidade com que esta chegará na parte inferior do tubo, desprezando o atrito será:

$$v = \sqrt{2.g.h} = \sqrt{2.9,8.5,5} = 10,4\text{m/s}$$

Utilizando o valor do impulso calculado no item 4.3.2, obtém-se a massa necessária para aquele valor.

$$I = m.v \Rightarrow 394,3 = m.10,4 \Rightarrow m = 37,9\text{kg}$$

Supondo um cilindro regular que será preenchido com sucata de aço com densidade $d_{s1}=5,5 \text{ g/cm}^3$, 30% inferior à densidade do aço maciço ($d_a=7,8 \text{ g/cm}^3$) devido aos espaços entre os pedaços de sucata, a altura deste cilindro, para um diâmetro de 150mm (15,0cm), deverá ser de:

$$dens = \frac{m}{V} = \frac{m}{\pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot a} \Rightarrow a = \frac{m}{\pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot dens} = \frac{37900}{\pi \cdot \frac{15^2}{4} \cdot 5,5} = 39\text{cm}$$

Construção e montagem do banco de ensaios:

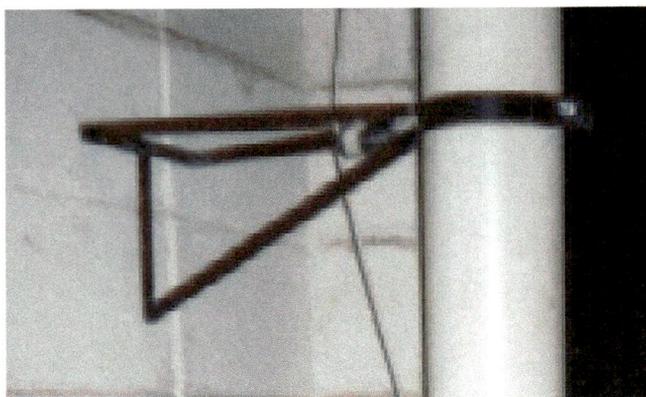
Para a construção do banco de ensaios foram adquiridos no comércio local os seguintes materiais e componentes:

- 01 tubo em Cloreto de Polivinila (PVC) do tipo para esgoto com diâmetro externo de 6 polegadas (152,4mm) e interno de 147mm, com 6,0m de comprimento,
- 12m de cantoneira de aço perfil “L” 1/2 x 1/2 polegadas (12,7 x 12,7 mm),
- 3m de barra de aço chata de 1 ½ x 1/16 polegadas (38,1 x 1,6 mm)
- 01 roldana com diâmetro de 10cm, do tipo das utilizadas em construções civis de pequeno porte,
- 20m de corda de fios de polipropileno (PP) trançados com diâmetro de 1/4 de polegada (6,4mm),
- 01 carcaça vazia de um extintor de incêndio com capacidade para 6kg de pó químico com medidas externas de 140mm de diâmetro e 410mm de comprimento (doada pela firma Ueno’s Extintores de São Carlos),
- 40kg de sucata de aço miúda, subproduto de um processo de estampagem,
- diversos elementos para fixação (barras roscadas de 3/8 e de 1/4 de polegada (9,5 e 6,4mm), porcas, arruelas, barras de aço e outros).

Foi necessário confeccionar os suportes da roldana e do tubo de PVC pois os mesmos não foram encontrados no comércio. Eles foram construídos em cantoneiras de abas iguais, perfil “L” citada acima, entalhadas, dobradas e soldadas na forma de um tetraedro. O suporte da roldana, foi executado de modo a permitir que a mesma fosse pendurada por meio de um furo e os suportes do tubo foram executados de modo que este fosse fixado por meio de um parafuso vinculado a uma braçadeira confeccionada em ferro chato (Figura 5.2).

Para confeccionar a massa de queda livre e após a exploração de algumas alternativas, desde a construção utilizando o próprio tubo de PVC, refileado e preenchido com concreto armado até a construção de um cilindro de aço soldado preenchido com limalha de aço. Optou-se por adotar um cilindro de extintor de incêndio com capacidade de 6kg de pó químico e dimensões exteriores de 140mm de diâmetro e 410mm de comprimento com o fundo abaulado com convexidade semelhante à do crânio carneiro e que desta maneira simularia o crânio do oponente.

Figura 5.2 – Suporte do tubo de PVC, executado em cantoneiras de abas iguais, perfil “L”, entalhadas, dobradas e soldadas na forma de um tetraedro



Esta alternativa se mostrou viável pois este cilindro ajusta-se com uma folga total de 7 mm no diâmetro interno do tubo de PVC, considerada razoável para evitar grandes atritos durante a queda livre.

O cilindro estava quase pronto sendo necessárias algumas adaptações na válvula original para que a mesma pudesse servir como suporte para o conjunto e o cilindro pudesse ser içado por esta. Este sistema de válvula, sendo roscado no cilindro, permite que o enchimento deste se dê por este orifício de aproximadamente 40mm.

Além disso, foi feito um corte na saia de apoio destinada a manter o cilindro na vertical quando apoiado no chão. O cilindro pronto pode ser visto na Figura 5.3,

Figura 5.3 – Cilindro de extintor de incêndio adaptado para uso como massa de queda livre suspenso pelo sistema de içamento e abaixo um pouco da sucata de aço usada no seu preenchimento



Esse cilindro será preenchido com sucata de aço do tipo das utilizadas em contra pesos de portões residenciais automáticos, obtida no comércio local e cuja densidade foi medida e resultou em $d_s=4,1\text{g/cm}^3$, valor 25% inferior ao anteriormente estimado.

Supondo que a forma do cilindro é regular e que a espessura das paredes seja uniforme e com valor de 1.5mm, isto resulta em dimensões internas de 137mm de diâmetro e altura de 407mm. Supondo ainda que a proporção entre pedaços de sucata e vazios que preencherá o cilindro seja a mesma da amostra com a qual obteve-se a densidade, a massa máxima de sucata possível de se acondicionar será:

$$m_s = d.V = d.\left(\pi.\frac{D^2}{4}.a\right) = 4,1.\left(\pi.\frac{13,7^2}{4}.40,7\right) = 24,6\text{kg}$$

Adicionando a massa própria do cilindro que é 3kg, tem-se a massa total de queda livre, que será:

$$m_t = m_s + m_c = 24,6 + 3,0 = 27,6\text{kg}$$

Esta massa estimada é 27% menor que a estimada inicialmente, mas como serão feitos testes com material seco (ossos secos) espera-se que seja suficiente para testá-los. Ainda mais, se a massa for excessiva, pode-se preencher o cilindro com outros materiais de densidade inferior.

O custo total do banco de ensaios, sem incluir a instalação, foi de R\$150,00 (câmbio: 1,80 R\$/US\$).

Para a montagem do banco de ensaios, era necessário uma área no solo pequena, em torno de $1,0\text{m}^2$, mas um pé direito alto, acima de 7,0m.

Dentre as opções que se dispunha, que incluía a instalação ao ar livre e dentro do prédio da oficina mecânica da EESC-USP, optou-se, após a autorização do responsável, por montá-lo no Laboratório de Ensaios do Departamento de Estruturas da EESC-USP, no prédio que abriga a ponte rolante.

Este local foi o escolhido devido ao pé direito e às facilidades técnicas e humanas disponíveis nesse laboratório para a realização dos ensaios.

Primeiramente foram fixados os suportes da massa de queda livre e do tubo alinhados. Parte dos suportes (o da roldana e o superior do tubo) teve que ser fixado por meio de braçadeiras à estrutura metálica que suporta o telhado do prédio (Figura 5.4). Os outros suportes foram fixados por meio de buchas plásticas e parafusos na parede do prédio (Figura 5.5).

Figura 5.4 – Montagem do suporte da roldana do banco de ensaios para impactos no prédio da ponte rolante do Departamento de Estruturas da EESC - USP.



Posteriormente o tubo foi içado utilizando o próprio sistema de roldana e corda com um gancho fixado na parte inferior do tubo e a corda passando por dentro do mesmo. Posicionado o tubo o mesmo foi fixado por meio das braçadeiras (Figura 5.6).

O comprimento do tubo de PVC teve que ser cortado em 40cm para que o mesmo se adaptasse aos suportes e à distância do solo permitindo a inserção da massa de queda livre.

Figura 5.5 – Suportes inferiores do banco de ensaios.



Figura 5.6 – Banco de ensaios montado – vista completa. A área ocupada no piso foi de 1,5 x 1,0 m enquanto que sua altura alcançou 7,0 m



Construção e montagem da base:

Para a montagem da base, pensou-se em simular o sistema mola amortecedor encontrado na natureza, ou seja, quando o animal recebe o impacto,

toda a energia do choque é dissipada nos músculos do pescoço e pelo movimento do corpo.

Para tanto, através de tiras de borracha, vinculou-se o crânio à ser testado a um sistema de molas que simularia os músculos do pescoço do animal e este sistema a um sistema mola – amortecedor que simulasse o corpo do animal.

Para o sistema de molas (Figura 5.7), foi construída uma base quadrada em madeira compensada com dimensões 250x250mm e 15mm de espessura, com 4 guias de Pinus de secção 30x20mm e alturas de 160mm (2), 140mm (1) e 100mm (1), à qual foram inseridas 7 molas na forma de tubos de polietileno (PE) com reforço helicoidal de diâmetros interno de 37mm e externo de 45mm com alturas de 150mm (1), 170mm (1), 190 (1) e 210mm (4), do tipo utilizado nos sistema de tratamento de água de piscinas.

Figura 5.7 – Parte superior da base, mostrando da esquerda para a direita: as tiras de borracha para amarração, a base com o sistema de 4 guias e as 7 molas plásticas



Para o sistema mola amortecedor (Figura 5.8) foi utilizado um pneu do tipo 185/70/14 da Goodyear ao qual foi acoplada uma base de madeira compensada com diâmetro de 400mm e espessura de 15mm, com 4 furos de diâmetro 10,0mm para permitir a passagem do ar, funcionando assim como uma amortecedor e com 3 reforços em Pinus de secção 40x50mm e comprimento de 200mm e 3 guias de Pinus de secção 60x40mm e altura de 70mm. A base montada é mostrada na Figura 5.9.

Figura 5.8 – Parte inferior da base, mostrando da esquerda para a direita: o pneu e a parte de baixo da base com reforço.

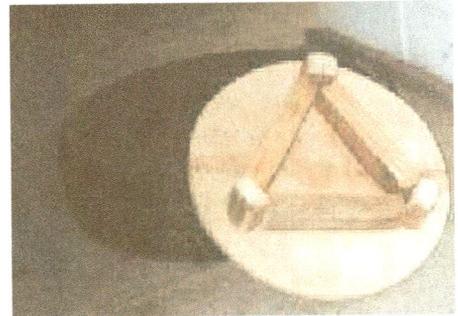


Figura 5.9 – Vista completa da primeira tentativa de montagem da base de apoio para os corpos de prova (fotomontagem).



Infelizmente, como mostra a Figura 5.10, a parte superior da base, que simularia o pescoço e os músculos do animal, não apresentou desempenho satisfatório ao ser carregada com uma força peso estática de 100N, apresentando grandes deformações laterais no sistema de molas de polietileno azul e instabilidade. Isso fez com que esta parte da base tivesse que ser reformulada.

Figura 5.10 – Deformação lateral da parte superior da primeira tentativa de montagem da base ao ser carregada com uma força peso estática.



Para contornar o problema descrito acima, foi construída uma nova base, aproveitando a parte de baixo da anterior e inserindo as molas com guia na parte inferior desta, conforme mostram as Figura 5.11 e 5.12.

O custo dos materiais para a construção das bases foi de R\$30,00.

Figura 5.11 – Segunda tentativa de montagem da base, sem o pneu amortecedor (fotomontagem)



Para acoplar o crânio nesta nova base foi preciso construir três bases de apoio, uma para cada crânio, que foram confeccionadas com diversos pedaços de madeira cortados sob medida e colados, sendo posteriormente esculpidas com fresa rotativa acoplada a uma furadeira, grossa e limas manuais.



Figura 5.12 – Segunda tentativa de montagem da base, com o pneu amortecedor.

Os crânios foram colados nas respectivas bases utilizando massa epóxi (Durepoxi®), conforme mostram as Figuras 5.13 e 5.14. É interessante notar que houve a preocupação de manter a região do crânio que sofre impacto paralela à base. Cada base levou 2 dias para ser executada com um custo em materiais de R\$5,00 cada.

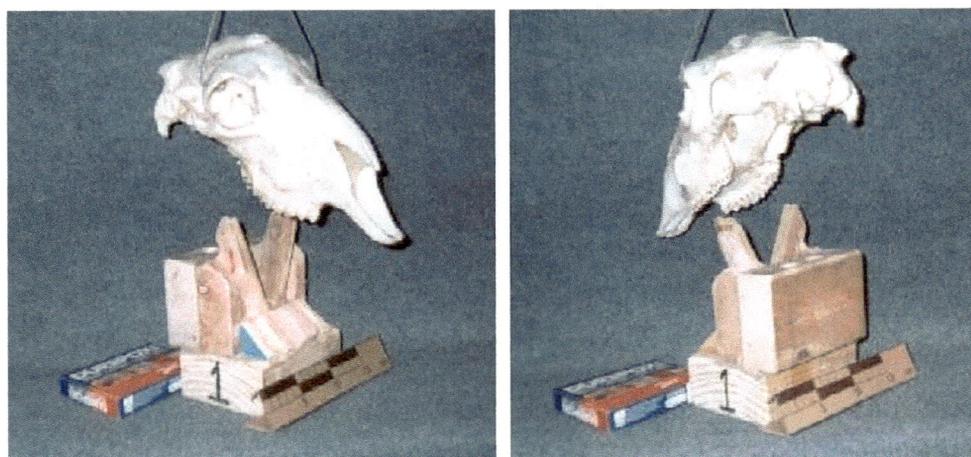


Figura 5.13 – Corpo de prova A1 (crânio) e sua respectiva base de apoio de madeira. São mostradas as partes da base antes de serem coladas com massa epoxi.

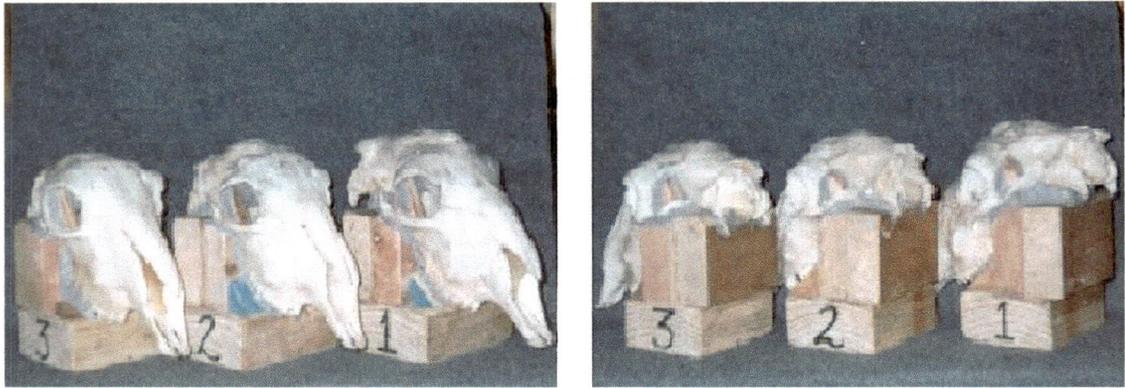


Figura 5.14 – Corpos de prova A1, A2 e A3 colados com massa epoxi em suas respectivas bases de apoio de madeira para a realização de testes de impacto e de carregamento estático.

5.2 – Ensaio Com Crânios Naturais

Com o banco de ensaios montado, e as bases prontas, foram realizados com os 3 (três) crânios disponíveis um ensaio estático não destrutivo e dois ensaios destrutivos de impacto.

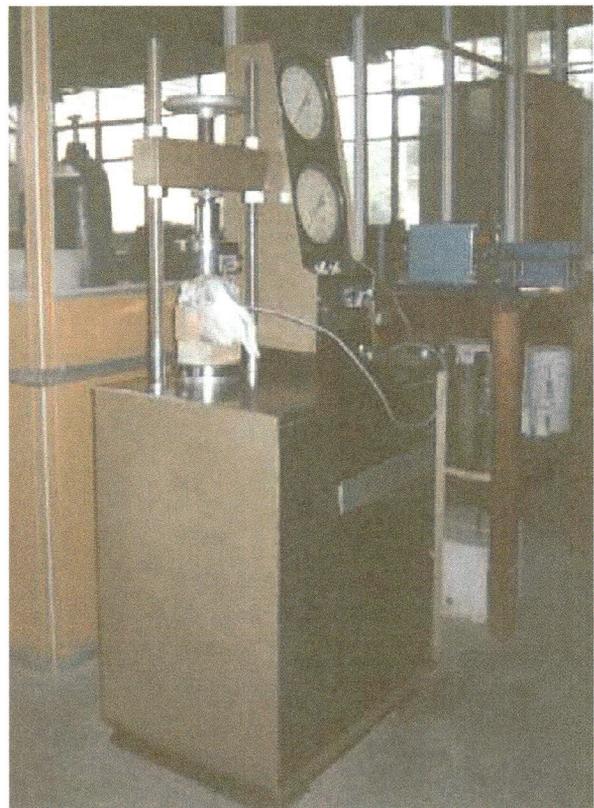
Pensava-se em revestir a superfície dos crânios com uma fina camada de verniz frágil para verificar as linhas de ruptura que ocorreriam no verniz quando a peça fosse carregada. Como as tensões são perpendiculares à estas linhas de ruptura, ter-se-ia uma idéia da direção das tensões e pela proximidade das linhas de ruptura, ter-se-ia idéia da intensidade dessas tensões.

Chegou-se a produzir um dos tipos de verniz, mas como as linhas de ruptura do verniz frágil somente são visíveis quando tracionadas e como nos ensaios são esperadas tensões principalmente de compressão, este método foi abandonado. Além disso, nos ensaios de impacto a carga seria adicionada e retirada rapidamente, não tendo tempo para que as trincas se propagassem e mesmo que elas o fizessem, quando a carga fosse retirada elas se fechariam.

Ensaio estático não destrutivo.

Com um dos crânios colado em sua respectiva base, denominado corpo de prova A3, foi realizado um ensaio estático de compressão em duas fases, utilizando uma Máquina Hidráulica de Ensaios de Tração e Compressão marca Versa Tester 30M, pertencente ao Departamento de Estruturas da EESC-USP (Figuras 5.15 e 5.16). Em ambas as fases, o crânio solidarizado à sua base foi posicionado sobre a base móvel da máquina e o cabeçote superior posicionado para comprimir levemente o conjunto sobre a região do osso parietal que na natureza recebe os impactos.

Figura 5.15 – Ensaio estático não destrutivo- corpo de prova A3, fase 1, utilizando a máquina hidráulica de testes Versa Tester 30M e uma célula de carga Mitutoyo com capacidade máxima de 10.000N acoplada a um indicador de deformação Transdutec (caixa azul à direita).



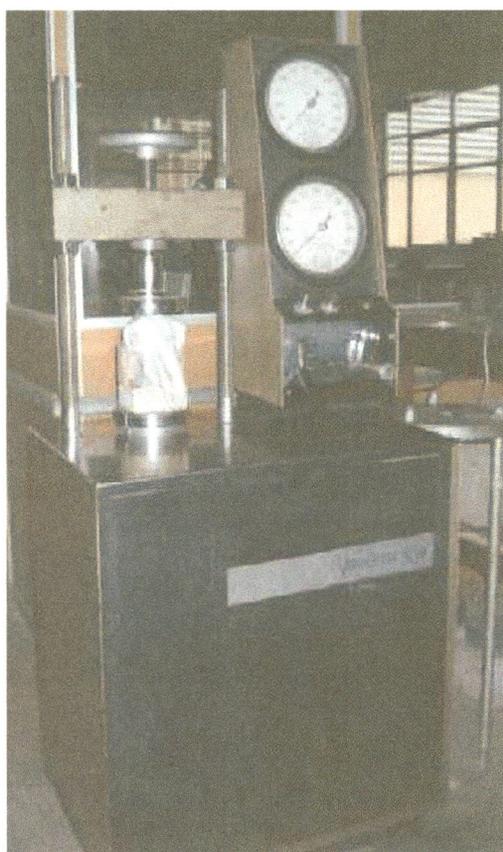
Na primeira fase deste ensaio, foi utilizada, conforme a Figura 5.15 uma Célula de Carga marca Mitutoyo, modelo 001-1000 com capacidade para 10kN, colocada entre o crânio (na região que sofre impactos na natureza) e o prato do cabeçote superior de modo que o carregamento fosse executado através da mesma e registrado em um Indicador Eletrônico Digital de Deformação da marca Transdutec, modelo TMDE. A área de contato entre a célula e o crânio foi

circular de diâmetro 1,0cm o que corresponde a uma área de $0,79\text{cm}^2$. Não foram utilizados os indicadores da própria máquina pois para carregamentos relativamente baixos (em torno de 5.000N, que era o limite esperado para este teste), os mesmos não apresentam boa precisão.).

O conjunto foi carregado à compressão com uma velocidade de carregamento de 600N/min. Quando a carga atingiu 5.000N e depois 7.500N foram ouvidos pequenos estalidos. Quando foi atingida a carga de 9.900N, embora o crânio não apresentasse sinal auditivo ou visual de ruptura, o carregamento foi retirado para não exceder a capacidade da célula de carga e danificá-la.

Na segunda fase do teste (Figura 5.16) foi utilizado o mesmo corpo de provas da primeira fase mas medindo a carga de compressão aplicada através de um dos indicadores de carga análogos da própria máquina com fundo de escala de 400.000N,. O outro, embora tenha fundo de escala menor (250.000N) não foi utilizado pois segundo depoimento dos técnicos não apresenta boa precisão.

Figura 5.16 - Ensaio estático não destrutivo – corpo de prova A3, fase 2 utilizando a máquina de testes Versa Tester 30M e os indicadores análogos da própria máquina com fundo de escala de 400.000N.



O corpo de prova foi posicionado e a área de contato entre o prato e a região do osso parietal também foi circular de diâmetro 1,0cm (área de 0,79cm²). O conjunto foi carregado com uma velocidade de 4.000N /min até atingir um carregamento de 10.000N quando foram ouvidos pequenos estalos que pela sua característica julgou-se ser do osso.

O conjunto continuou a ser carregado até que quando foi atingido o carregamento de 12.500N, ouviram-se estalos mais fortes, também típicos de ossos se partindo e como o objetivo deste ensaio não era o de destruir o conjunto, o mesmo foi parado. Em inspeção visual do crânio, não foram constatadas trincas ou deformações aparentes nem no crânio nem na base acoplada.

Supondo que a carga é aplicada uniformemente na área circular e que a distribuição de tensões também é uniforme, a tensão média de compressão nesta região (área circular de 0,79cm²) é de aproximadamente 15.800N /cm².

Posteriormente, utilizou-se parte deste crânio para a reprodução em resina de poliuretano à base de óleo de mamona

Ensaio de impacto destrutivos.

Para os ensaios dinâmicos destrutivos de impacto, foram usados os dois crânios restantes disponíveis.

Como os crânios estavam limpos e secos há mais de 6 meses, para tentar reproduzir as condições da natureza, um deles (corpo de prova A2) foi deixado por uma semana mergulhado em uma solução de soro fisiológico à 0,9% de NaCl de modo a ser hidratado.

O resultado desta hidratação não foi satisfatório pois as uniões entre as placas ósseas começaram a se deteriorar sendo que algumas, as mais frágeis pertencentes aos maxilares e narinas e não pertencentes à caixa craniana, se soltaram. Mesmo assim foi possível realizar o teste de impacto.

O osso parietal dos crânios solidarizados com suas respectivas bases foram posicionados no centro da base anteriormente construída por meio de três parafusos para madeira (Figura 5.17) e todo o conjunto posicionado visualmente

e tomando por referência marcações executadas na base do cilindro (Figura 5.18) de modo que a massa de queda livre atingisse esta região de impacto.

Figura 5.17 – Posicionamento por meio de parafusos dos corpos de prova do tipo A na base amortecida.

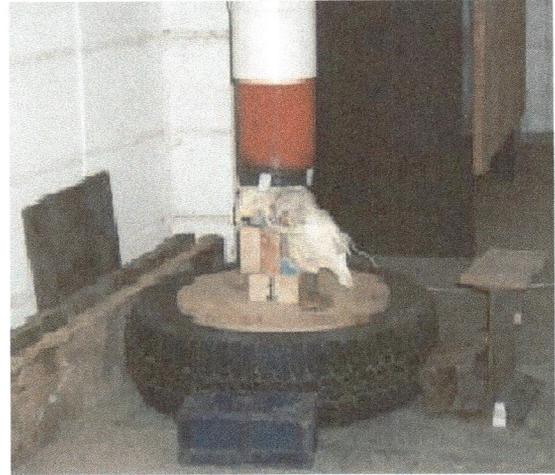
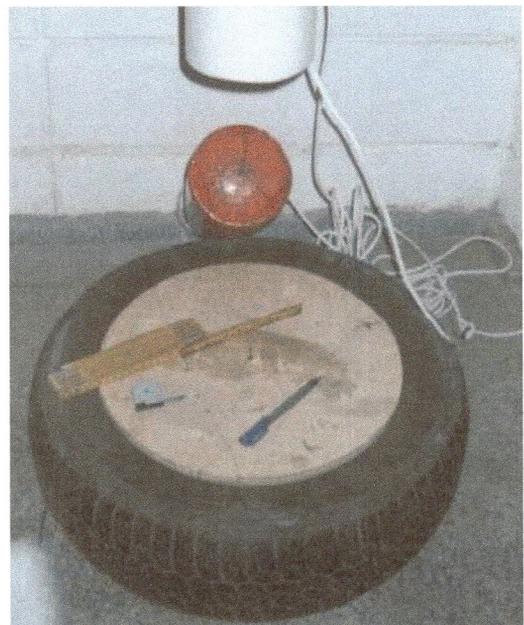


Figura 5.18 – Marcações de centro na base do cilindro para posicionamento visual do conjunto base e corpos de prova.



Para a realização destes testes, ao cilindro de extintor foi adicionada uma massa de 7kg de sucata, que somada com a massa do cilindro resultou em 100N.

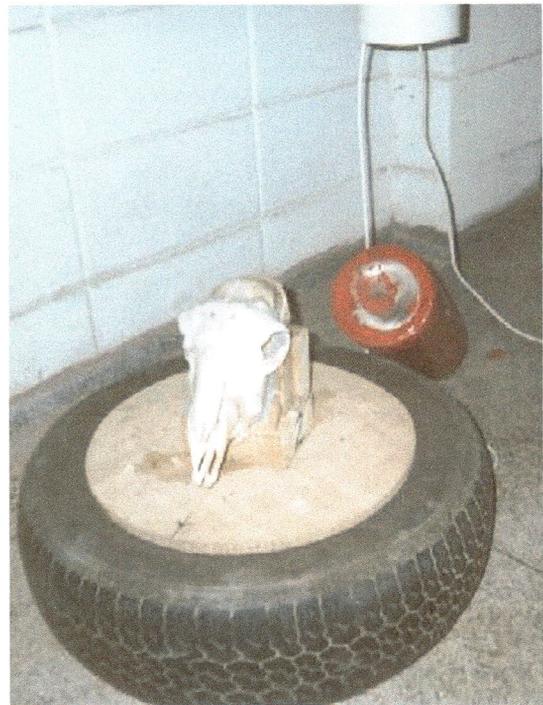
Para medir a altura de queda desta massa foi utilizada uma corda com uma escala em metros e frações marcada ao longo de seu comprimento e com um ímã em sua extremidade (0,0m da escala) que era fixado à base do cilindro.

O cilindro foi solto sucessivamente de 1,0m e 2,0m de altura sendo que nenhum dano foi observado nem no crânio nem no cilindro.

Foi realizado um terceiro teste, desta vez soltando a massa de queda livre de 10,0kg de uma altura de 3,0m. Neste ponto dos testes ocorreu que a parte inferior convexa do extintor que entrou em contato com o crânio na hora do impacto sofreu uma deformação permanente, conforme mostra a Figura 5.19, tornando-se côncava.

A massa de 7kg de sucata de aço não preencheu o cilindro em sua totalidade, ficando o cilindro vazio em aproximadamente $2/3$ de sua porção superior.

Figura 5.19 – Deformação da base do cilindro de extintor de incêndio no choque com o crânio do carneiro.



Durante a queda livre do cilindro a massa de sucata que estava impregnada com óleo do processo de estampagem que a originou, por inércia e tomando o cilindro como referência, se deslocou para a parte superior do cilindro, sendo que no momento do impacto primeiro houve o choque da massa do cilindro como se ele estivesse vazio (3kg) e posteriormente a sucata (7kg) caiu gradualmente, de modo que pode ser ouvido um chiado que por vezes se assemelhou ao ruído da chuva.

Para sanar este problema foi soldada na base do cilindro e conforme a Figura 5.20 uma placa de aço de $\frac{1}{4}$ de polegada (6,4mm) de modo a reforçar este cilindro. Com isso foi perdida a concavidade do cilindro que visava reproduzir as condições da natureza, ou seja, o crânio do oponente.

Figura 5.20 –
Reforço de uma
placa de aço de
6,4mm soldada na
base do cilindro.



Voltando a realização dos testes, o cilindro foi completamente carregado com areia grossa de construção ficando com uma massa total de 11,8kg.

Esta variação de massas do cilindro e de alturas de queda livre será contabilizada de modo a se ter duas grandezas de comparação, sendo uma o Impulso e outra a Energia Cinética.

Voltando aos testes, soltou-se a massa de queda livre de 11,8kg de uma altura de 1,0m sobre o crânio hidratado (corpo de prova A2) e já estressado dos testes anteriores e o mesmo rompeu.

Realizando uma nova bateria de testes, desta vez com o crânio seco (corpo de prova A1), a massa de queda livre foi solta de alturas de 1,0m, 2,0m e 3,0m sendo que a ruptura ocorreu somente no último ensaio.

Os resultados dos testes com o crânio natural estão sumarizados nas Tabelas 5.I (corpo de prova A2) e 5.II (corpo de prova A1).

Ensaio C. P. Tipo A2	Massa de queda livre [kg]	Altura de queda da massa [m]	Velocidade do impacto [m/s]	Impulso [N.s]	Energia cinética [J]	Ruptura do crânio (sim/não). Observações
1	3,0*	1,0	4,4	13,3	29,4	Não
2	3,0*	2,0	6,3	18,8	58,8	Não
3	3,0*	3,0	7,7	23,0	88,2	Não (afundamento do cilindro)
4	11,8	0,5	3,1	36,9	57,8	Sim

Tabela 5.I – Sumarização dos testes realizados com o corpo de prova A2 (crânio natural montado em base de madeira) hidratado com soro fisiológico.

* massa do cilindro vazio.

Ensaio C. P. Tipo A1	Massa de queda livre [kg]	Altura de queda massa [m]	Velocidade do impacto [m/s]	Impulso [N.s]	Energia cinética [J]	Ruptura do crânio (sim/não). Observações
1	11,8	0,5	3,1	36,9	57,8	Não
2	11,8	1,0	4,4	52,2	115,6	Não
3	11,8	2,0	6,3	73,9	231,3	Não
4	11,8	3,0	7,7	90,5	346,9	Sim

Tabela 5.II – Sumarização dos testes realizados com o corpo de prova A1 (crânio natural montado em base de madeira) seco.

As linhas de ruptura do corpo de prova A2 podem ser vistas na Figura 5.21

As linhas de ruptura do corpo de prova A1 podem ser vistas na Figura 5.22

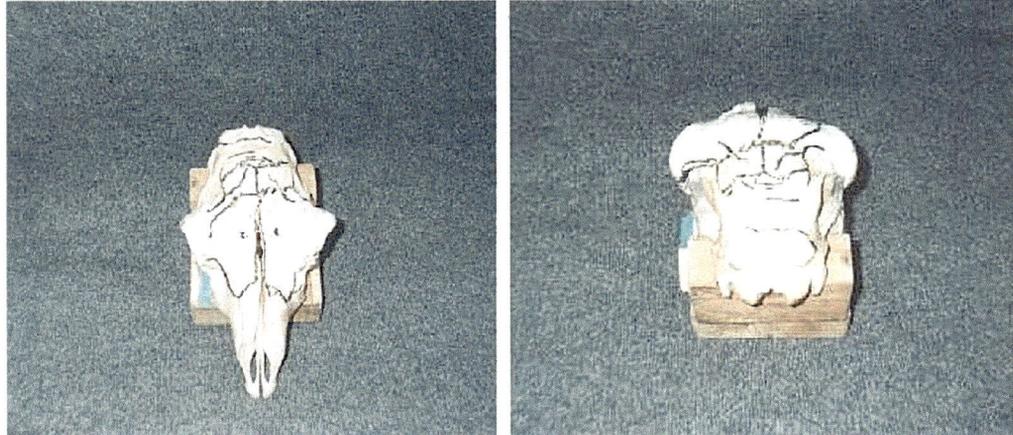
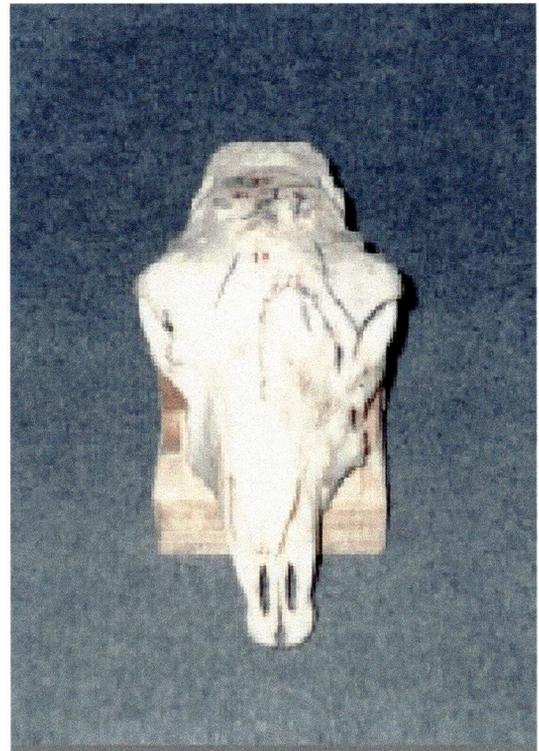


Figura 5.21 – Estado do corpo de prova A2 após ensaio de impacto destrutivo. As linhas em preto sobre o crânio ressaltam as trincas observadas no corpo de prova.

Figura 5.22 – Linhas de ruptura do corpo de prova A1 após ensaio de impacto destrutivo. As linhas em preto sobre o crânio ressaltam as trincas observadas no corpo de prova.



5.3 – Ensaio com Modelos de Parte do Crânio em Resina de Poliuretano à Base de Óleo de Mamona.

Na natureza, os carneiros que lutam com intensidade, desferindo golpes violentos nos adversários são os machos adultos. Como geralmente estes animais são os reprodutores, já que se não tiverem este destino são abatidos ainda jovens (cordeiros), é difícil se conseguir crânios destes animais.

Para contornar este problema e obter dados que permitissem avaliar o comportamento dessas estruturas quando submetidas a esforços estáticos e dinâmicos, foi necessária a construção de corpos de prova que reproduzissem a geometria espacial do crânio do carneiro. Assim, foram construídos modelos em resina da parte superior de um dos crânios obtidos.

O Material escolhido para os corpos de prova.

Para a construção dos corpos de prova o material genérico indicado seria um termofixo com cura à temperatura e pressão ambiente, pois isto resultaria numa simplicidade de construção dos moldes e dos modelos. Dentre os materiais com esta característica pode-se citar: as resinas epóxi, e as resinas poliuretânicas e as resinas de silicone.

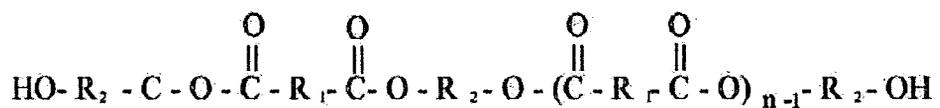
O material escolhido, por sugestão de PURQUÉRIO (1999), foi um Poliuretano derivado de óleo de mamona, desenvolvido pelo Grupo de Química Analítica e Tecnologia de Polímeros (GQATP) do Instituto de Química da USP de São Carlos com vistas à aplicações médicas, particularmente próteses ósseas. A escolha recaiu sobre esse polímero por dois motivos principais.

Primeiramente, pretende-se utilizar este polímero na construção de próteses ósseas para uso humano e seu comportamento ao impacto ou ainda o uso desse polímero para testes, poderia ser usado para aprimorar o desenvolvimento das aplicações dessa resina. Em segundo lugar, como essa tecnologia é plenamente dominada pelo referido laboratório e tendo eles todos os materiais e equipamentos para a realização da construção dos modelos locados no campus da USP de São Carlos, isto facilitaria e baratearia a construção dos modelos.

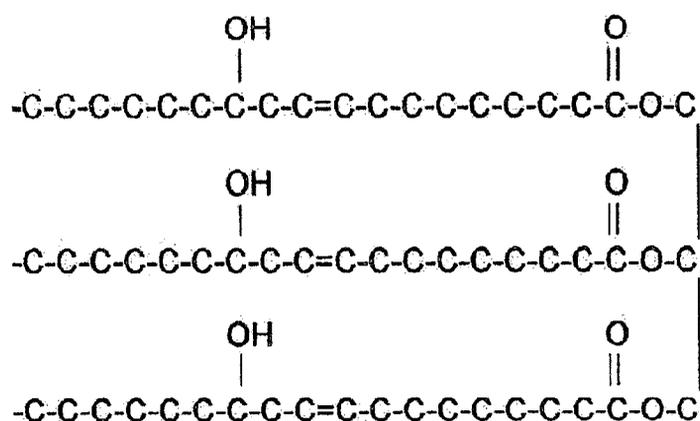
O objetivo aqui não será testar e caracterizar o material quanto ao impacto, mas sim testar diferentes geometrias espaciais utilizando sempre o mesmo material a fim de compará-las.

O material utilizado foi desenvolvido e testado por CLARO NETO (1997) e é um poliuretano composto por um polioliol e um pré-polímero com relação estequiométrica em massa de 0,66 : 1. Ao resultado deste composto podem ser adicionadas quantidades de CaCO_3 que variam de 10% a 50% da massa total do composto polioliol/pré-polímero.

O polioliol utilizado (Equação 5.1) é um poliéster derivado do ácido ricinoleico, mais precisamente do triglicéride do ácido ricinoleico. Este, por sua vez, é um polioliol natural trifuncional encontrado no óleo de mamona na proporção de 89% e cuja molécula é mostrada na Equação 5.2.

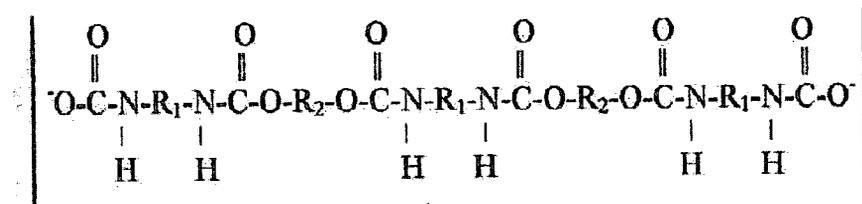
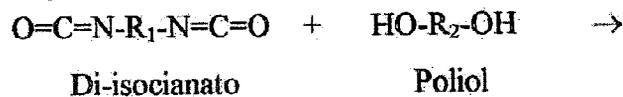


Equação 5.1 – Polioliol Poliéster genérico (CLARO NETO, 1997)



Equação 5.2 – Molécula do Triglicéride do Ácido Ricinoleico (CLARO NETO, 1997)

O pré polímero utilizado foi sintetizado a partir do MDI (Difenilmetano diisocianato), que devido à sua alta reatividade foi pré-polimerizado com um poliol derivado do óleo de mamona e cuja reação pode ser vista na Equação 5.3.



Pré-polímero

Equação 5.3 – Equação de obtenção do pré-polímero (CLARO NETO, 1997).

Ao composto podem ser incorporadas quantidades de carbonato de cálcio (CaCO_3) de 10, 20, 30, 40 e 50 % em massa com relação à soma da massa poliol / pré-polímero.

Para a construção do modelo, foi utilizado o poliuretano com a máxima resistência a tração e com média resistência à compressão, o que corresponde a uma carga de CaCO_3 de 30% em massa, com relação à soma da massa de poliol/pré-polímero, conforme mostra a Figura 5.23. Esta escolha se deveu ao fato de que nos corpos de prova deste trabalho é esperado que as cargas de impacto produzam predominantemente tensões de compressão devido à forma geométrica espacial dos mesmos. Dessa maneira espera-se que esta escolha evidencie rupturas devidas à compressão.

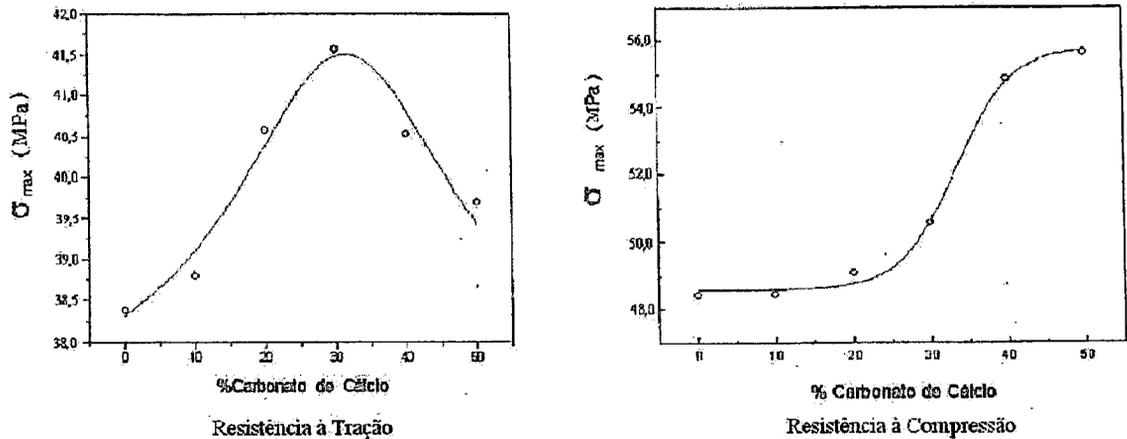


Figura 5.23 – Gráficos da resistência à tração e à compressão da resina de poliuretano derivada de óleo de mamona em função da carga de CaCO_3 (CLARO NETO, 1997).

Muito embora a resistência mecânica desta resina seja inferior à do osso, como mostra a Tabela 5.III, esta servirá bem ao propósito de serem realizados testes comparativos entre diferentes geometrias espaciais. As propriedades mecânicas dessa resina também serão utilizadas em alguns modelos utilizando o método dos elementos finitos.

Este material tem demonstrado compatibilidade com organismos vivos, não apresentando rejeição e tem sido usado como cimento ósseo para implantes e próteses, reparador de perdas ósseas e como material para próteses.

O carbonato de cálcio entra na composição da resina pois melhora suas propriedades mecânicas e também tem a função biológica pois sendo um ativador da superfície na interface osso/polímero, estimula o crescimento ósseo quando implantado em recuperações ósseas. Em regiões com irrigação sanguínea promove o crescimento das células que vão recompondo o osso original em substituição ao polímero, ou seja, este vai sendo metabolizado e em seu lugar ocorre um crescimento ósseo (CLARO NETO, 1997).

Propriedade Mecânica.	Poliuretano derivado de óleo de mamona com 30% de CaCO ₃ (CLARO NETO, 1997).	Osso trabecular de carneiros (vértebra lombar L2) (AERSSENS, 1998).	Osso cortical humano (diáfase da tíbia) (SHIMANO, 1994 {a} e YAMADA, 1970 apud SHIMANO, 1994 {b}).
Densidade [g/cm ³]	1,0 (aproximadamente)	0,44	1,6 {a}
Módulo de elasticidade à tração [M Pa]	1776,0	-	8080,0 {a} 18400,0 {b}
Tensão de escoamento [M Pa]	41,5	13,2	174,0 {b}
Deformação para o limite de escoamento (%)	3,4	-	1,5 {b}
Módulo de elasticidade à compressão [M Pa]	1839,7	-	-
Tensão máxima de Compressão [M Pa]	50,5	-	-
Deformação para máxima tensão de compressão (%).	3,7	-	-
Coefficiente de Poisson	0,4	-	0,35 {a}
Dureza [Shore D]	79	-	-

Tabela 5.III – Quadro comparativo das propriedades mecânicas do Poliuretano derivado de óleo de mamona com 30% de CaCO₃, Osso trabecular de carneiro e Osso cortical humano (CLARO NETO, 1997, AERSSENS, 1998, SHIMANO, 1994 e YAMADA, 1970 apud SHIMANO, 1994))

Porção do crânio à ser modelada.

Para a obtenção da matriz óssea, dos 3 crânios disponíveis, foi escolhido o crânio n° 3 (corpo de prova A3), previamente utilizado no teste de carregamento estático não destrutivo, por esse apresentar a região de impacto com melhor harmonia estética, poucos defeitos como calcificações e calos ósseos, resultantes de ferimentos durante a vida do animal e não ter sido inutilizado no ensaio estático.

A parte selecionada para a construção dessa matriz foi aquela onde está o osso parietal que na natureza recebe os impactos. Para uma matriz com a qual pudessem ser obtidos modelos em resina possíveis de serem executados com um molde de silicone, foi feita um secção reta na “tampa” do corpo de prova A3 (crânio), utilizando arco de serra (Figura 5.24).

Foram cortados os ossos occipital, parietal, frontais e temporal de modo que a caixa craniana interna que contém o cérebro do animal fosse cortada ao meio e que fossem obtidos ângulos de saída tanto na superfície externa quanto na interna (que abriga o cérebro do animal) que propiciassem, para um molde bipartido, uma fácil desmoldagem.

Figura 5.24 –
Corte
executado no
corpo de
prova A3.



Construção do molde bipartido em borracha de silicone.

Devido a uma experiência prévia do Laboratório de Polímeros, foi indicado que o melhor material para a construção dos moldes para a confecção dos corpos de prova seria o silicone e este poderia ser o utilizado por dentistas e protéticos na construção de moldes para próteses dentárias. Em consulta às firmas especializadas, verificou-se que este material, por ser para uso humano e com propriedades adequadas para a confecção de próteses, tinha preço relativamente elevado, em torno de R\$ 100,00 (US\$ 60,00) por quilograma.

Buscou-se então um fornecedor de silicone para uso industrial, que poderia se adequar às exigências de esterilidade e precisão. Após uma exaustiva busca no comércio local e regional e finalmente em firmas especializadas da cidade de São Paulo, foi encontrada a firma D'Altomare com seu representante locado na próxima cidade de Rio Claro (ver Anexo 3).

Após serem tratadas as especificações técnicas, bem como o custo, foi adquirido um balde com 4 kg de borracha de silicone produzida pela Dow Chemical sob código 3-8001, acompanhado de 200 g de catalisador à base de platina, a um custo total de R\$160,00 (US\$89,00) posto na cidade de Rio Claro - SP. Juntamente com o produto, foi fornecido um manual para a construção de moldes que também pode ser visto no Anexo 3.

A proporção de catalisador recomendada e utilizada na obtenção da borracha de silicone foi de 5% da massa da resina, ou seja, para cada 100 g de resina foram adicionadas 5 g de catalisador.

Dos vários tipos possíveis para a construção do molde em borracha de silicone, foi escolhido o tipo bipartido, por se adequar melhor às características do moldado em termos de forma e tamanho. O molde terá uma metade macho e outra fêmea.

Para a construção dos moldes em silicone, primeiramente foi construída, conforme a Figura 5.25 uma caixa em Duratex® revestido com uma superfície melamínica (superfície esta utilizada na região de contato com o silicone para facilitar a retirada do molde da caixa) com dimensões internas de 15 x 15 x 5 cm.

A parte interna desta caixa foi vedada com massa para calafetar de modo a impedir vazamentos da resina de silicone.

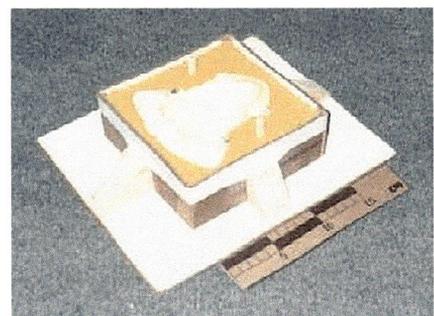
Figura 5.25 - Caixa de Duratex® com uma superfície melamínica, calafetada e com a matriz óssea posicionada e apoiada na placa e nos enchimentos laterais de isopor. Pode ser visto também o enchimento parcial com massa de modelar (em azul)



Em seguida a matriz em osso previamente preparada foi posicionada sobre uma placa de Isopor® (poliestireno expandido) com espessura de 10mm ajustada no fundo da caixa, para permitir a execução de uma parede de aproximadamente 1 cm tanto na superfície da parte macho quanto no fundo da parte fêmea.

Os vazios nas laterais, entre a matriz e as paredes da caixa, também foram preenchidos previamente com isopor. Como este não preencheu todos os vazios nem deu acabamento superficial à futura interface entre as metades, isto foi executado através da utilização de massa para modelar da marca Estrela (do tipo das utilizadas em pré escolas) de modo que os vazios restantes fossem preenchidos e a superfície de interface nivelada com a superfície de corte da matriz (Figura 5.26).

Figura 5.26 – Caixa com a matriz posicionada e a última camada de enchimento (em amarelo) executada com massa para modelar. Podem ser vistos também os 2 pinos guia de madeira.



Nesta superfície foram inseridos 2 pinos guias de madeira para o posicionamento das duas metades do molde quando pronto. Esta superfície ficou 1,0cm abaixo da borda da parede da caixa. Em seguida foi passada uma demão generosa de vaselina líquida em todas as partes que teriam contato com a borracha de silicone e a caixa foi colocada numa superfície nivelada.

As quantidades estequiométricas em massa da borracha de silicone e do catalisador foram obtidas indiretamente pelo volume pois as densidades de ambos são conhecidas. O volume de borracha de silicone foi medido em um recipiente graduado de plástico e a de catalisador através do corpo de uma seringa hipodérmica.

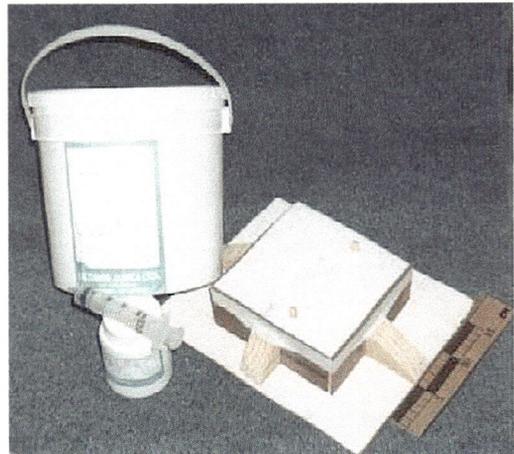
Após uma estimativa da quantidade de borracha de silicone necessária para a confecção da metade superior, a borracha de silicone foi vertida cuidadosamente em um recipiente metálico, foi adicionado o catalisador e feita a mistura dos dois de maneira suave de modo a incorporar o mínimo possível de ar. Para fazer a parte macho deste molde foram usadas 290g de borracha de silicone.

Como no local onde foi executado o molde não havia bomba de vácuo, a base do o recipiente onde estava a mistura foi batida diversas vezes contra uma superfície de madeira de modo que eventuais bolhas fossem eliminadas.

Após isso, a borracha de silicone foi vertida cuidadosamente na caixa preparada. Esta caixa com o silicone também recebeu batidas moderadas com um pedaço de madeira para que as bolhas incorporadas subissem e foi deixada imóvel para polimerizar por um prazo de 18 horas com o aquecimento de uma lâmpada incandescente posicionada sobre o sistema para acelerar e garantir este processo. O resultado final pode ser visto na Figura 5.27.

Após a cura da metade macho do molde ela foi retirada da caixa que foi desmontada. A caixa foi então remontada, novamente calafetada e a metade macho posicionada invertida, em relação à moldagem anterior, no fundo da caixa.

Figura 5.27 – Parte macho do molde de silicone ainda na caixa após a cura. São mostradas também as embalagens da resina e do catalisador utilizados.

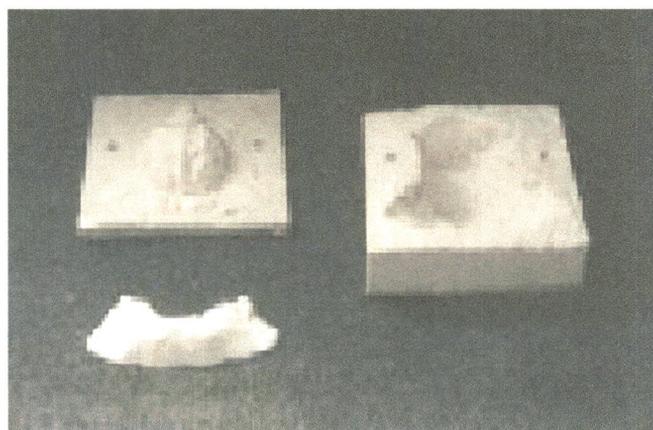


À seguir a matriz em osso à ser moldada foi colocada em seu respectivo lugar sobre a metade macho e sobre toda esta superfície (matriz e metade macho) foi passada uma demão generosa de vaselina líquida para evitar que ao ser moldada a metade fêmea aderisse à metade macho. Posteriormente na confecção de outros moldes, foi utilizada nesta fase vaselina sólida com melhores resultados.

Foi repetido o processo de preparação da borracha de silicone e a metade fêmea do molde bipartido foi moldada. Nesta metade fêmea foram utilizadas 835g de borracha de silicone.

Após a cura, o molde foi aberto na superfície onde previamente foi passada vaselina, e a matriz foi retirada, restando um vazio possível de ser preenchido com resina à base de óleo de mamona (Figura 5.28).

Figura 5.28 – Molde de parte do crânio. Metades macho, fêmea e postição.



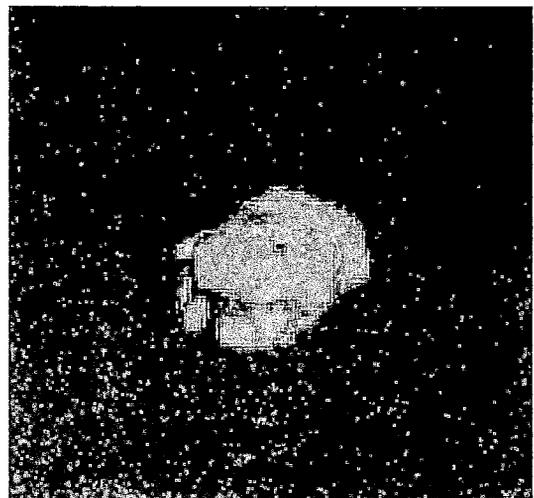
Durante a confecção do molde e também do levantamento da geometria espacial que foi executado com vistas à modelagem por elementos finitos, surgiu uma hipótese sobre a resistência do crânio a impactos. A porção posterior da matriz óssea utilizada, tem espessuras consideráveis de aspecto resistente. A parte frontal dessa matriz utilizada na confecção dos moldes, na região onde estão os Sinus Frontais (cavidades), apresentava duas paredes de pequena espessura e entre elas os Sinus propriamente dito.

Esta configuração chamou a atenção pela aparente fragilidade e por estar na região de impacto. Estes dois aspectos antagônicos sugeriram um possível perfil de estrutura resistente ao impacto que pode ser melhor visto no Capítulo 6.

Para estudar a influência da parede externa do Sinus na resistência do conjunto à impactos, resolveu-se adaptar o molde construído para moldar modelos sem a parede externa dos sinus.

Para tanto, a parede externa do Sinus Frontal foi retirada da matriz em osso através de serramento com o uso de arco de serra e posterior acabamento com grossa e lima e foi obtida uma segunda versão da matriz óssea (Figura 5.29).

Figura 5.29 – Matriz óssea sem a parede frontal do Sinus..



Pensava-se em confeccionar um novo molde com esta nova matriz óssea. Em vez disso, optou-se por executar um postigo também em silicone que

incorporado ao molde anteriormente executado permitisse execução de modelos do crânio sem a parede dos Sinus Frontais.

Este postigo, mostrado anteriormente na Figura 5.28, foi feito colocando-se a matriz óssea serrada dentro do molde e em seguida todas as possíveis superfícies de contato com a borracha de silicone não polimerizada que seria vertida neste conjunto foi coberta com uma camada de vaselina sólida, tanto na matriz óssea quanto nas duas metades do molde. Foi colocada uma quantidade adequada de borracha de silicone catalisada entre a matriz óssea serrada e a parte fêmea do molde de silicone, e o molde foi fechado com a parte macho. O conjunto foi deixado imóvel para que a borracha se polimerizasse por um período de 18 horas com aquecimento de uma lâmpada incandescente. Foram utilizadas 40g de borracha de silicone no postigo.

Construção dos Corpos de Prova.

De posse do molde bipartido de parte do crânio e do postigo, puderam ser executados modelos em resina do crânio do carneiro.

Estes modelos foram executados no laboratório do Grupo de Química Analítica e Tecnologia de Polímeros (GQATP) do Instituto de Química da USP de São Carlos. Foram feitos 8 corpos de prova completos e 7 parciais, ou seja, sem a parede externa do Sinus Frontal.

O processo de execução dos corpos de prova tanto para um quanto para outro foi o seguinte:

Primeiramente a cavidade com ou sem o postigo e a superfície de junção dos moldes foi isolada usando vaselina sólida, os 2 pinos guias foram posicionados e o molde deixado na posição para receber a resina preparada.

No preparo da resina foi usado um recipiente plástico na forma de um balde com capacidade para 5 litros para facilitar a posterior deaeração à vácuo.

Este recipiente foi colocado sobre uma balança analítica de precisão e a mesma zerada. Após isso, adicionou-se a quantidade précalculada (conforme a Tabela 5.IV) de polioliol com código interno do laboratório 471 (Figura 5.30) e em seguida zerava-se novamente a balança e colocava-se a quantidade

estequiométrica de prépolímero com código interno do laboratório 329L (Figura 5.31), marcando-se então o tempo.

Figura 5.30 – Preparação da resina à base de óleo de mamona para a confecção de corpos de prova. Adição do Polioli com código interno do laboratório 471

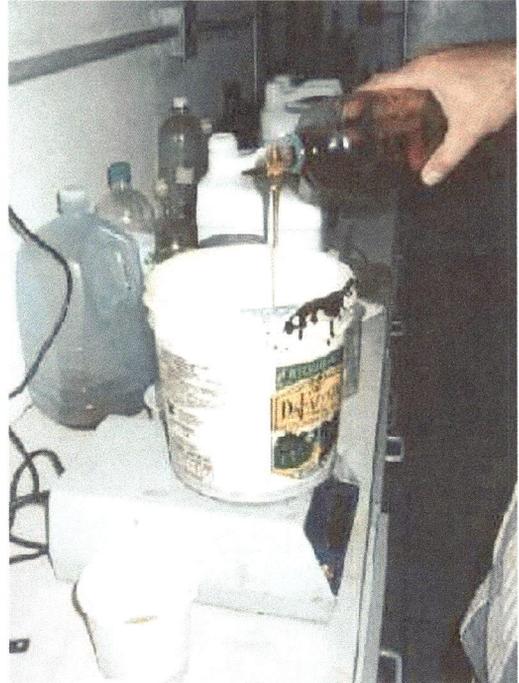


Figura 5.31 – Preparação da resina à base de óleo de mamona para a confecção de corpos de prova. Adição de Pré-polímero com código interno do laboratório 329L

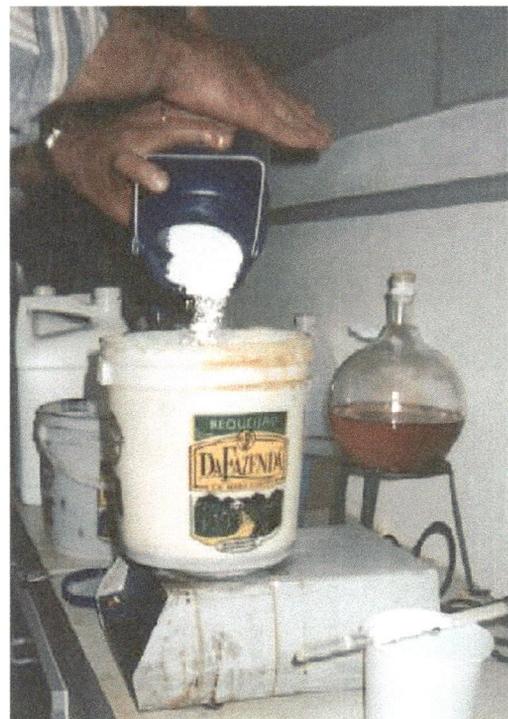


Tinha-se aproximadamente 10 minutos para executar todo o processo, após os quais a resina ia se tornando cada vez mais viscosa, dificultando sua colocação no molde.

Estes compostos eram então pré-misturados com uma vareta de vidro, sem preocupação com a incorporação de bolhas, por aproximadamente 1 minuto.

Após isso, colocava-se o recipiente novamente na balança analítica, a mesma era zerada e adicionava-se a quantidade escolhida de carbonato de cálcio analítico da marca Syntech que no caso deste trabalho foi de 30% da massa do polioli/prépolímero (Figura 5.32).

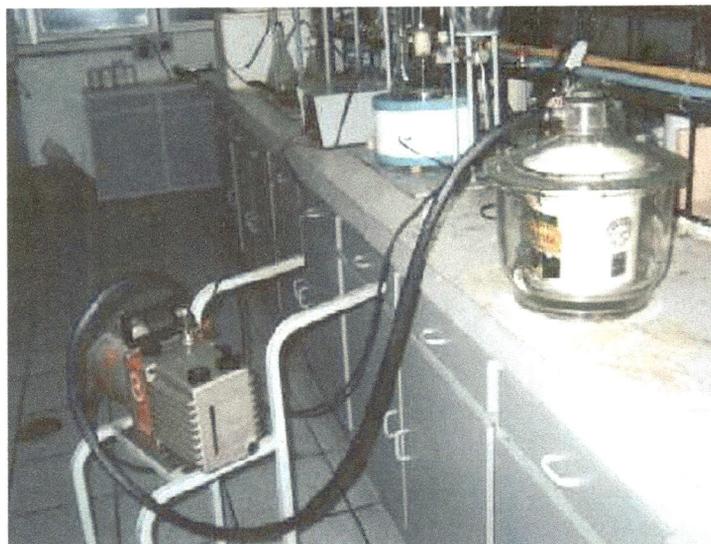
Figura 5.32 – Preparação da resina à base de óleo de mamona para a confecção de corpos de prova. Adição de Carbonato de Cálcio



Após uma homogeneização desse composto por 2 minutos, o recipiente era colocado dentro de um deaerador de vidro para fazer vácuo, este era fechado com a tampa hermética também de vidro e a mangueira vinda da bomba de vácuo ligada no bocal com válvula (Figura 5.33).



Figura 5.33 –
Preparação da
resina à base de
óleo de mamona
para a confecção
de corpos de
prova. Deaeração
para retirar bolhas.



O Processo de deaeração demorava aproximadamente 5 minutos, durante os quais a quantidade de bolhas de ar retirada era controlada ora desligando a mangueira do deaerador, ora movimentando vigorosamente o conjunto recipiente e deaerador para quebrar as bolhas por atrito da resina com ela mesma e com as paredes do recipiente. O aspecto e velocidade das bolhas de ar saindo da resina lembra o da fervura do leite bovino `a pressão atmosférica.

Quando o número de bolhas de ar começava a diminuir, desligava-se a bomba de vácuo, retirava-se a mangueira e a tampa do deaerador e a resina era cuidadosamente vertida dentro da cavidade da metade fêmea do molde evitando a incorporação de bolhas de ar (Figura 5.34).

Figura 5.34 – Preparação do corpo de
prova em resina à base de óleo de
mamona Colocação da resina na parte
fêmea do molde de silicone.



A parte superior do molde era então cuidadosamente posicionada com o auxílio dos pinos guia e sobre esta era colocada uma placa de aço de 1/2 polegada de espessura e 18cm x 18cm de superfície para pressionar a metade macho contra a metade fêmea e deixar vazar pela superfície de união a resina em excesso (Figura 5.35).

Figura 5.35 – Preparação do corpo de prova em a resina à base de óleo de mamona. Molde abastecido com a resina, fechado com a parte macho e com uma placa de aço como peso para tirar o excesso de resina, que escorre pela junção do molde.



Para a desmoldagem era necessário deixar a resina curar por no mínimo 4 horas. Se o corpo de prova fosse retirado antes desse tempo, corria-se o risco, como aconteceu, de o mesmo se deformar pois a resina não estaria completamente solidificada.

O tempo de cura total da resina é de 48 horas e todos os ensaios posteriores foram realizados respeitando este limite.

Para o modelo completo e o parcial foram utilizadas as massas de polioli, pré-polímero e carbonato de cálcio mostrada na Tabela 5.IV abaixo.

Embora a proporção estequiométrica de polioli : pré-polímero indicada por CLARO NETO (1997) fosse de 0,66 : 1, segundo recomendação do técnico do laboratório foi usada a proporção 0,70:1 e à massa total foi adicionado 30% de CaCO_3 .

Os valores da referida Tabela foram obtidos através de tentativa e erro e são maiores que a massa final dos corpos de prova pois necessitava-se de um excesso

de resina para garantir que, excluindo o que era perdido por adesão às paredes do recipiente de preparo, o molde fosse completado e que ainda vazasse um pouco de resina pela junção do molde.

Tipo do modelo	Massas [g]			
	Poliol	Pré-polímero	CaCO ₃	Total
B (Completo)	70,0	100,0	51,0	221,0
C (Parcial)	54,0	77,0	39,0	170,0

Tabela 5.IV – Massas de compostos da resina utilizados para confeccionar os corpos de prova.

Após a cura da resina e retiradas as rebarbas foi medida a massa total dos corpos de prova, sendo que o modelo completo apresentou média de 135,0g e o modelo parcial média de 105,0g.

Moldados, os corpos de prova do tipo B e C foram colados em placas suportes de Duratex® utilizando a própria resina como cola. As Figuras 5.36 e 5.37 mostram os passos da colagem. Depois disso, foi feito um furo de 7,0mm de diâmetro, logo abaixo do local do impacto de modo a posicionar o corpo de prova em um pino previamente inserido no centro da base amortecida.

Figura 5.36 – Corpo de prova do tipo B antes e depois da colagem em placa de Duratex®

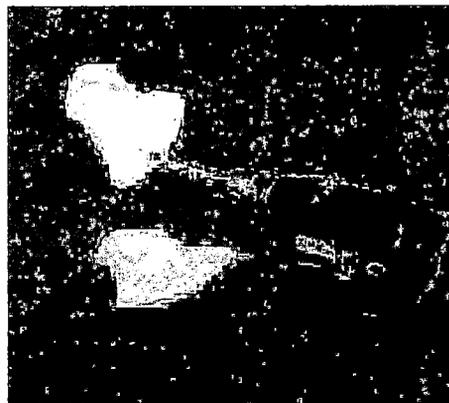


Figura 5.37 – Corpo de prova do tipo C antes e depois da colagem em placa de Duratex®



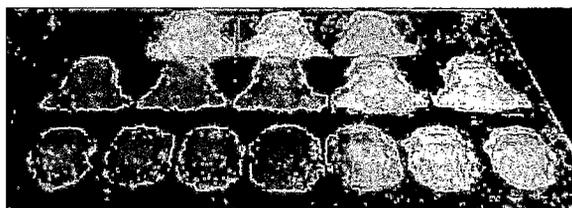
Antes de serem colados, nos corpos de prova do tipo B (completo) foram executados cuidadosamente os Sinus Frontais, uma vez que para permitir a execução do molde e posteriormente dos corpos de prova, estes foram tampados na matriz óssea com massa de calafetar. A Figura 5.38 mostra esta operação, executada com furadeira manual e broca de aço rápido de 10,0mm de diâmetro

Figura 5.38 – Furação do corpo de prova do tipo B para simulação dos Sinus Frontais.



A Figura 5.39 mostra todos os corpos de prova do tipo B e C produzidos, antes dos ensaios de impacto. A produtividade na confecção dos corpos de prova foi de 2 por dia útil. Como foram executados 8 do tipo B e 7 do tipo C, isto consumiu aproximadamente 2 semanas, levando-se em conta feriados e imprevistos.

Figura 5.39 – Total de corpos de prova do tipo B (acima) e C (abaixo) produzidos.



Ensaios com os corpos de prova do tipo B e C.

Previamente aos testes no banco de ensaios, foi realizado com um corpo de prova do tipo B (geometria espacial natural) um ensaio de impacto de avaliação e sem controle da energia aplicada. O corpo de prova do tipo B foi colocado sobre

uma bancada rígida de madeira e nele foi desferido um golpe com um martelo na região onde na natureza os carneiros sofrem os impactos.

O que se notou foi que o modelo se partiu na forma de uma estrela de 3 pontas posicionada quase que exatamente sobre o local onde estariam as suturas (uniões) das placas ósseas (Figura 5.40). Se o mesmo se partiu nestes locais é porque as tensões aí ocorridas foram mais elevadas que em outros pontos e responsáveis pela ruptura. Como a geometria espacial do corpo de prova é idêntica à da matriz em osso, estima-se que na natureza as tensões máximas ocorram na mesma região, ou seja, nas suturas.



Figura 5.40 – Ruptura de um corpo de prova do tipo B na forma de estrela devido a um impacto experimental com um martelo.

O osso plano, típico da caixa craniana, é um material com a mesma composição química em todas as direções mas com arranjos espaciais diferentes em sua secção transversal. Esta secção é do tipo sanduíche formada pelas camadas interna e externa de osso compacto tendo no meio osso esponjoso.

No caso particular das suturas no crânio, as mesmas são formadas por um tipo de união denominada de *sutura serrátil* (ou *serrata*) pois macroscopicamente tem a forma de um serrilhado cuja distribuição externa não coincide com a interna (BBC, 1993), configuração que visa aumentar a área de contato das placas ósseas. Microscopicamente esta união é caracterizada por estruturas que partindo de ambas as placas ósseas, gradativamente se unem com

modificações nos materiais empregados (WARWICK, 1979). Maiores detalhes serão abordados no Capítulo 6.

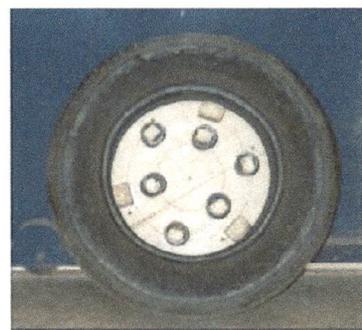
Em consulta à GUAZZELLI FILHO (1999), foi perguntado se estas suturas poderiam fornecer algum tipo de amortecimento com algum pequeno movimento e proteger, ou evitar maiores danos nas placas ósseas, atenuando e distribuindo as tensões que ali ocorrem. A resposta foi de que isso é possível, já que o material de união é mais mole que o das placas, principalmente em animais jovens, e estas suturas também são conhecidas como falsas articulações. Desse modo, esta falsa articulação (sutura) pode ser uma das responsáveis pela resistência do crânio do canino à impactos.

Pode-se afirmar que o amortecimento tem papel fundamental na resistência ao impacto das geometrias espaciais sujeitas a eles. É este amortecimento que salva a integridade das estruturas submetidas ao impacto.

Este tipo de fratura em estrela de 3 pontas também ocorreu em alguns corpos de prova submetidos posteriormente à impactos no banco de ensaios, principalmente quando a energia envolvida (altura de queda da massa) era relativamente pequena. Quando a energia era relativamente maior, os corpos de prova se estilhaçavam. Em ambos o aspecto da fratura era o de fratura frágil.

No início da utilização do banco de ensaios para testes com os corpos de prova em resina, a placa da base que se apoia no pneu se quebrou devido ao impacto e uma nova teve que ser feita. Esta nova base foi feita de modo mais reforçado para resistir aos esforços (Figura 5.41)

Figura 5.41 – Nova base. Esquerda: base superior. Direita: vista por baixo da nova base com o pneu.



Resolvido este imprevisto, os ensaios com os corpos de prova do tipo B e C no banco de ensaios (Figura 5.42) foram realizados e filmados todos em um só dia.

Foi utilizada a mesma massa de queda livre utilizada para os corpos de prova do tipo A. Os resultados obtidos são mostrados nas Tabelas 5.V e 5.VI abaixo.

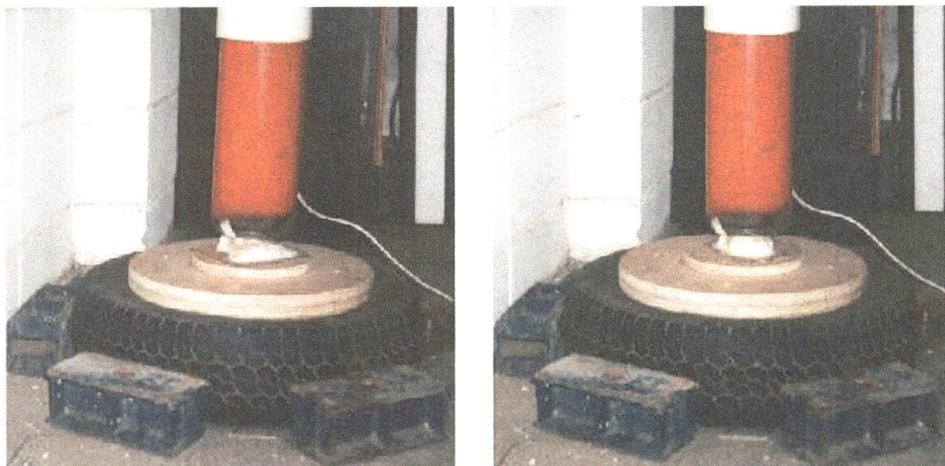


Figura 5.42 – Corpos de prova posicionados no banco de ensaios. À esquerda o Tipo B e à direita o Tipo C.

Ensaio C. P. Tipo B	Massa de queda livre [kg]	Altura de queda da massa [m]	Velocidade do impacto [m/s]	Impulso [N.s]	Energia cinética [J]	Ruptura do crânio	Forma da Fratura
1	11,8	1,0	4,4	52,2	115,6	Não	-
2	11,8	2,0	6,3	73,9	231,3	Não	-
3	11,8	3,0	7,7	90,5	346,9	Sim	Estilhaço
4	11,8	2,5	7,0	82,6	289,0	Não	-
5	11,8	2,75	7,3	86,6	318,0	Não	-
6	11,8	2,875	7,5	88,6	332,5	Sim	Estilhaço

Tabela 5.V – Sumarização dos testes realizados com os corpos de prova do tipo B (modelo completo em resina da parte superior do crânio do carneiro)

Ensaio C. P. Tipo C	Massa de queda livre [kg]	Altura de queda da massa [m]	Velocidade do impacto [m/s]	Impulso [N.s]	Energia cinética [J]	Ruptura do crânio	Forma da Fratura
1	11,8	1,0	4,4	52,2	115,6	Não	-
2	11,8	2,0	6,3	73,9	231,3	Sim	Estrela de 3 pontas
3	11,8	1,5	5,4	64,0	173,5	Sim	Estrela de 3 pontas e estilhaço
4	11,8	1,0	4,4	52,2	115,6	Sim	Estrela de 3 pontas e estilhaço
5	11,8	0,5	3,1	36,9	57,8	Não	-
6	11,8	0,75	3,8	45,2	86,7	Não	-
7	11,8	1,0	4,4	52,2	115,6	Sim	-

Tabela 5.VI – Sumarização dos testes realizados com os corpos de prova do tipo C (modelo parcial em resina de parte do crânio do carneiro sem a parede externa dos Sinus Frontais)

O aspecto dos corpos de prova Tipo B e C que após os ensaios se estilhaçaram totalmente ou parcialmente, com a outra porção na forma aproximada de uma estrela de três pontas seguindo as suturas que ocorrem na natureza pode ser visto na Figura 5.43.

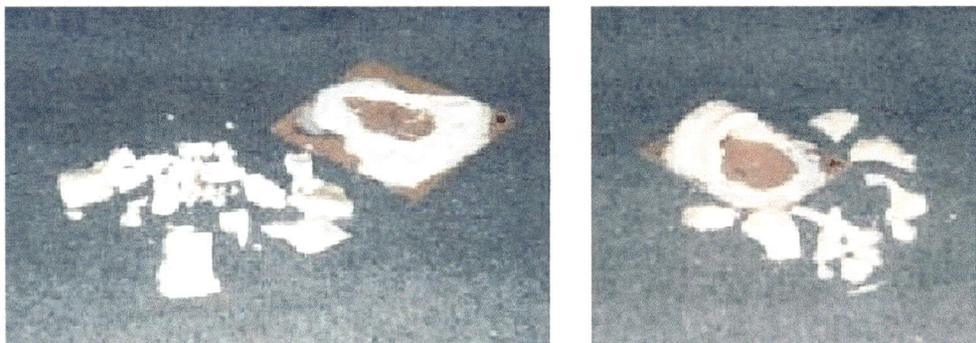


Figura 5.43 – Aspecto dos corpos de prova após ensaio de impacto. À esquerda o corpo de prova do Tipo B com fraturas do tipo estilhaço. À direita o corpo de prova do Tipo C com fratura parcial do tipo estilhaço e na parte .

Considerações sobre os resultados dos ensaios.

As análises abaixo supõem que a energia de retorno (rebote) é igual para ambos os tipos de corpos de provas testados, já que o sistema utilizado é o mesmo e a variação de massa dos corpos de prova é insignificante perto da massa do conjunto da base.

O número de corpos de prova testados não permitirão uma análise estatística do comportamento dessas geometrias à impactos. Mesmo assim, analisando as tabelas 5.V e 5.VI pode-se notar que:

O corpo de prova do tipo B suportou um impulso máximo de 86,6N.s (equivalente à queda livre de uma massa de 11,8Kg de 2,75m) sem romper.

O corpo de prova do tipo C suportou um impulso máximo de 45,2N.s (equivalente à queda livre de uma massa de 11,8Kg de 0,75m) sem romper.

Em termos absolutos, nota-se que o corpo de prova do tipo B (completo) suporta 91,6% mais energia que o corpo de prova do tipo C.

Mas ao levar em conta a massa dos corpos de prova esses números se alteram. Para tanto, será calculado um índice que consiste na divisão da energia suportada (Impulso em [N.s]) pela massa dos corpos de prova em [g].

Como o corpo de prova do tipo B tem massa média de 135,0g este índice será:

$$i_B = I_B/m_B = 86,6 / 135 = 0,64\text{N.s/g}$$

A massa média do corpo de prova do tipo C é de 105,0g. Desse modo:

$$i_C = I_C/m_C = 45,2 / 105 = 0,43\text{N.s/g}$$

Comparando esses dois índices temos que a energia por unidade de massa suportada pelo corpo de prova do tipo B é 48,8% maior que aquela suportada pelo corpo de prova do tipo C.

Ambas as análises conduzem à conclusão que a parede externa dos Sinus frontais tem influência na resistência ao impacto.

Os dados dos testes ao impacto dos corpos de prova do tipo A e mais especificamente aqueles do corpo de prova A1 apontam para uma resistência a um impulso de 73,9N.s (que corresponde à queda livre de uma massa de 11,8Kg

de a uma altura de 2,0m), mesmo tendo sofrido outros impactos anteriores (0,5 e 1,0m), o que já não ocorreu com a maioria dos corpos de prova dos tipos B e C.

Não é possível fazer uma comparação entre os dados dos ensaios dos corpos de prova do tipo A com aqueles dos tipos B e C pois os materiais são diferentes (osso e madeira versus resina) e as massas dos corpos de prova também são diferentes, com a massa dos corpos de prova do tipo A bem maiores que as dos tipos B e C. Conseqüentemente o comportamento aos ensaios também foi diferente.

Os resultados dos ensaios estáticos superou as expectativas pois estimava-se que o crânio suportaria uma carga menor que 12.500N.

5.4 – Modelamento pelo Método dos Elementos Finitos

Para melhor conhecer o comportamento das tensões do crânio foi executado o modelamento de parte deste crânio utilizando o método dos elementos finitos.

Foi usada a versão 5.2 universitária do ANSYS®, programa de computador elaborado pela ANSYS, Inc. que possui aplicação geral em análise de engenharia com o auxílio do computador (*CAE - Computer Aided Engineering*) através do Método de Elementos Finitos.

A decisão pela utilização de tal programa de computador foi baseada na verificação prévia da possibilidade desse realizar as simulações necessárias. Através da consulta aos manuais do programa (ANSYS Revision 5.2, 1995(a), 1995(b), 1995(c), 1995(d) e 1996), ficou claro que o mesmo tem ferramentas que possibilitam tal simulação.

Esta versão está instalada na rede de computadores do Laboratório de CAD/CAE do Departamento de Engenharia Mecânica da EESC-USP, funcionando sob o sistema operacional UNIX em estações de trabalho IBM Risc 6000.

O programa oferece recursos para a realização de análises estruturais estáticas e dinâmicas, lineares e não lineares (grandes deflexões e *gaps*),

superposição modal, resposta harmônica, transiente espectral e randômica, bem como não linearidades geométricas, de material e/ou de elementos, tais como viscoplasticidade, *creep* e elastoplasticidade. Conta com uma biblioteca de vários tipos de elementos, que o torna capaz de realizar as simulações necessárias ao projeto. Ainda conta com recursos gráficos para pré e pós-processamento e recursos de criação de geometrias equivalentes a modeladores sólidos disponíveis no mercado

Pensou-se em usar também a versão LS-DYNA3D do ANSYS®, programa elaborado pela Livermore Software Technology Corporation do qual o referido laboratório possui uma licença e que utiliza a tecnologia denominada de Método Explícito de Elementos Finitos. Tem por objetivo a análise de modelos de sólidos inelásticos com grandes deformações que demandem estudos altamente não lineares ocorrendo em intervalos de tempo infinitesimais, aplicável, por exemplo, no estudo da colisão de veículos automotores, penetração de projéteis, propagação de ondas de choque e processos de conformação de metal.

Como o objetivo era não de ver o comportamento da estrutura se deformando, pois quando isto ocorre na natureza implicaria na morte do animal, mas sim o comportamento das tensões sob carregamento de impacto e momentos antes de uma possível ruptura, optou-se por utilizar a versão 5.2 Universitária do ANSYS®.

Para executar a simulação utilizando o ANSYS 5.2, precisava-se primeiro executar a modelagem sólida da geometria espacial da parte superior do crânio do animal ovino envolvida no impacto para após isso executar a geração (automática ou não) da malha de elementos finitos e em seguida a simulação de carregamento.

A metodologia comumente recomendada para o modelamento é começar de formas mais simples e ir aumentando a complexidade do modelo de forma gradativa. Neste procedimento pode –se ter resultados já desde os primeiros modelos o que vai realimentando e direcionando o processo e estimulando o trabalho do modelador. Neste trabalho foi adotado o procedimento inverso, ou seja , começou-se de um modelo bastante complexo e que não produziu

resultados práticos e gradativamente foram feitas simplificações até que se chegou um ponto em que foi possível se obter resultados.

O modelamento por meio de primitivas geométricas e operações da álgebra booleanas foi descartado desde o início devido à complexidade das formas do crânio do animal e ao desejo de se ter a máxima aproximação das formas naturais.

Digitalização de parte do crânio do carneiro.

Foi escolhido então como caminho o levantamento geométrico espacial do crânio dos ovinos com a finalidade de se obter dados de forma, dimensionais e volumétricos que permitam a construção de modelos tridimensionais virtuais, para com estes modelos executar ensaios de impacto ou simulações.

Para executar este levantamento geométrico espacial pensou-se como ponto de partida a digitalização das superfícies. Foram exploradas diversas alternativas para esta digitalização que incluíam:

- 1 - Digitalização à laser, suavização e geração de superfícies, serviço prestado pela empresa FLAG de Diadema-SP,
- 2 - Digitalização por contato de uma sonda utilizando a máquina automática computadorizada da Mitutoyo, serviço fornecido pela firma Calibrate de São Paulo-SP,
- 3 - Digitalização utilizando a digitalizadora por agulha modelo Picza da Roland, serviço fornecido pela firma Procam de Bauru – SP,
- 4 - Obtenção de imagens através do tomógrafo desenvolvido no Instituto de Física da USP de São Carlos e instalado na Santa Casa de São Carlos.
- 5 - Digitalização utilizando a Máquina de Medir 3 Coordenadas Computadorizada do Laboratório de Metrologia do Departamento de Engenharia Mecânica da EESC-USP.

Dentre estas opções foi escolhida a última opção mencionada, ou seja, a digitalização utilizando a MM3C pois todas as outras envolviam não somente os custos da prestação de serviços, como também custos eventuais de viagens e hospedagens.

A opção escolhida além de ser mais barata é também a mais prática visto que o sistema de medição está no campus da USP de São Carlos e não haveria perda de qualidade na digitalização pois a máquina tem precisão de microns e a precisão requerida estimada para a digitalização é da ordem de décimos de milímetro uma vez que há grande variação dimensional (da ordem de unidades de milímetros) nas amostras obtidas.

A máquina de medir à ser utilizada é do tipo Ponte Móvel, modelo Micro Validator fabricada pela firma Brown & Sharpe Mfg Co. em 1988 e tem incerteza linear, repetibilidade e resolução da ordem de milésimos de milímetro.

Como mostra a Figura 5.44, foi realizada uma digitalização por pontos da superfície na região do impacto do crânio 3 ainda não montado na base de apoio que seria utilizado nos ensaios estáticos, conforme mencionado no item 5.2.

O crânio foi disposto sobre a mesa da MM3C de modo que seu eixo longitudinal estivesse alinhado com o eixo Y da máquina. A digitalização foi feita, conforme a Figura 5.45, colhendo a cada 3,0mm as coordenadas espaciais de pontos dispostos ao longo de linhas previamente traçadas no sentido paralelo ao longitudinal do crânio (eixo Y) com uma distância de 2,0mm entre cada linha no sentido transversal (eixo X). Foram colhidos 1680 pontos.

Figura 5.44 –
Digitalização
da superfície
externa do
crânios 3
utilizando a
MM3C do
Laboratório de
Metrologia do
SEM – EESC
– USP.

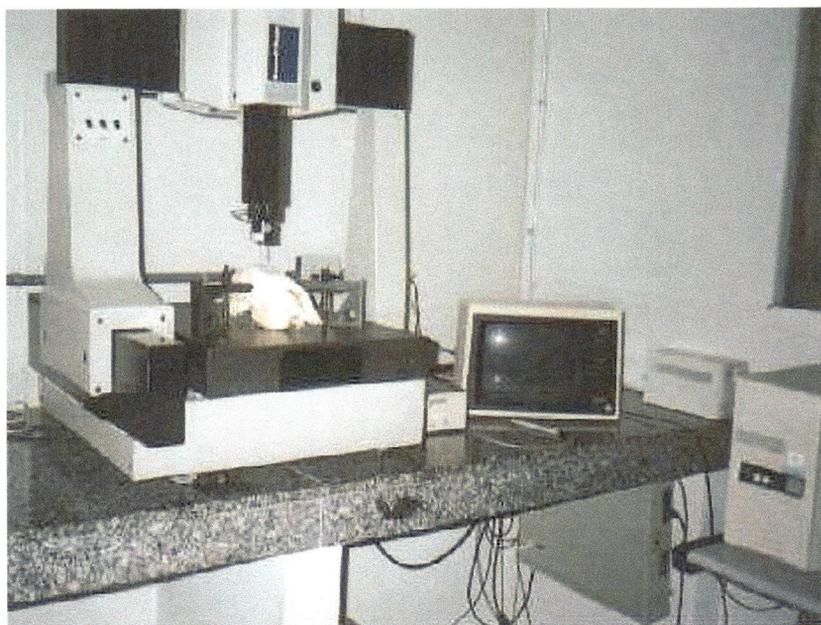
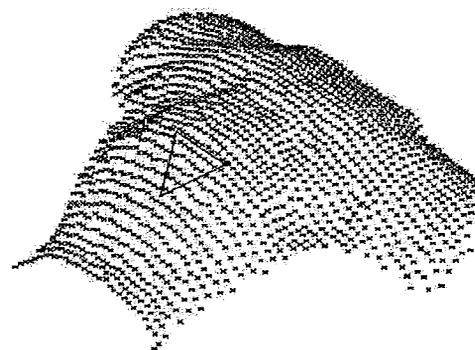


Figura 5.45 – Nuvem de pontos obtida com a digitalização da superfície externa do crânio 3. O triângulo servirá para a montagem com a digitalização da superfície interna.



Nesta digitalização também foram colhidas as coordenadas de três pontos localizados na região de impacto e dispostos de modo a formar um triângulo para a posterior montagem dos conjuntos de pontos das digitalizações interna e externa para a formação do volume da peça.

As coordenadas tridimensionais dos pontos medidas, foram capturadas por uma placa de aquisição de dados desenvolvida por FLORES (1999) do Laboratório de Metrologia e processadas por um programa em Pascal do mesmo autor para serem armazenadas em um arquivo de dados com extensão .DAT.

O arquivo .DAT foi convertido para o formato .IGS (IGES) utilizando um programa conversor desenvolvido por FENEDA (1998) do Laboratório de CAD/CAE.

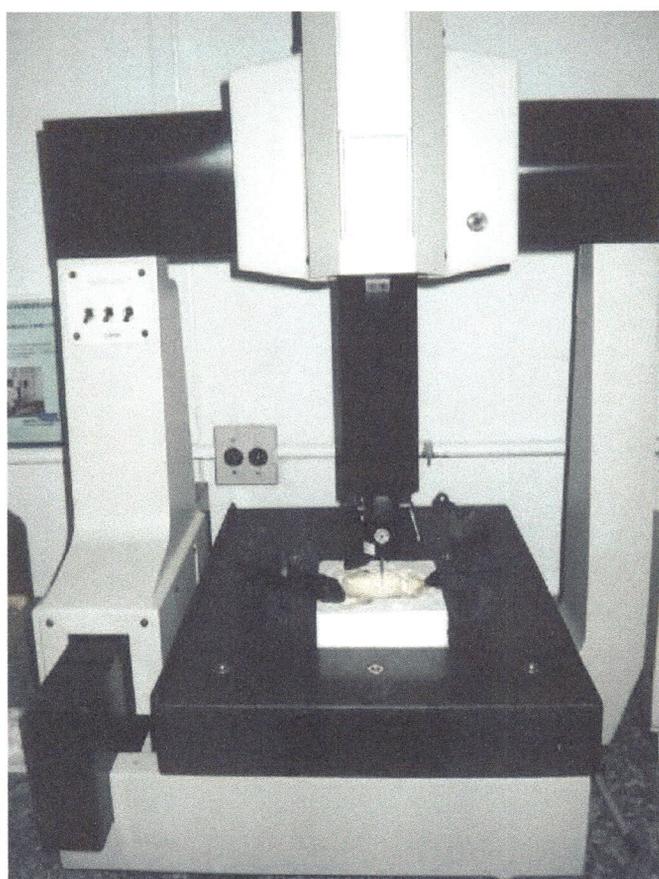
Este arquivo .IGS foi utilizado para alimentar o programa AutoCAD® onde foi possível visualizar a nuvem de pontos (Figura 5.45) e interligar os pontos do triângulo de referência. Após estas operações foi executada uma exportação também no formato .IGS.

A digitalização da superfície interna do crânio foi executada após os ensaios estáticos expostos no item 5.2. O crânio 3 foi cortado de modo conveniente, utilizado como matriz para a confecção do molde em silicone e posicionado, conforme a Figura 5.46, dentro da cavidade da parte fêmea deste molde, sobre a mesa de granito da MM3C com seu eixo longitudinal na direção perpendicular ao eixo longitudinal da digitalização anterior (externa), ou seja, ao longo do eixo X

da máquina de modo que durante a montagem das superfícies digitalizadas se pudesse distinguir uma da outra pela visualização das linhas de coleta de pontos que seriam perpendiculares.

A digitalização foi feita colhendo a cada 3,0mm as coordenadas espaciais de pontos dispostos ao longo de linhas previamente traçadas no sentido paralelo ao longitudinal do crânio (eixo X) com uma distância de 2,0mm entre cada linha no sentido transversal do crânio (eixo Y). Foram colhidos 877 pontos

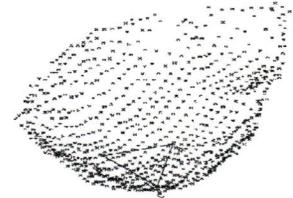
Figura 5.46 –
Digitalização da
superfície interna do
crânio do carneiro 3. O
molde em silicone
utilizado na confecção
dos modelos foi usado
como suporte.



Pelos pontos do triângulo marcado na superfície externa foram feitos furos passantes de diâmetro 1,5mm utilizando uma furadeira de bancada de modo que se pudesse colher as coordenadas destes furos na digitalização da superfície interna.

As coordenadas dos pontos colhidas foram processadas do mesmo modo que para a superfície externa e a nuvem de pontos e o triângulo de referência podem ser vistos na Figura 5.47.

Figura 5.47 - Nuvem de pontos obtida com a digitalização da superfície interna do crânio 3. O triângulo servirá para a montagem com a digitalização da superfície externa.



A espessura do crânio nos locais dos furos passantes executados no crânio nos vértices do triângulo de referência foram medidos utilizando uma esfera de aço de 5,0mm de diâmetro como apoio e um paquímetro com a haste para medição de profundidades cilíndrica e de diâmetro 1,5mm, conforme a Figura 5.48.

Figura 5.48 – Paquímetro usado na medição da espessura do crânio ao longo dos furos passantes executados nos vértices do triângulo de referência.

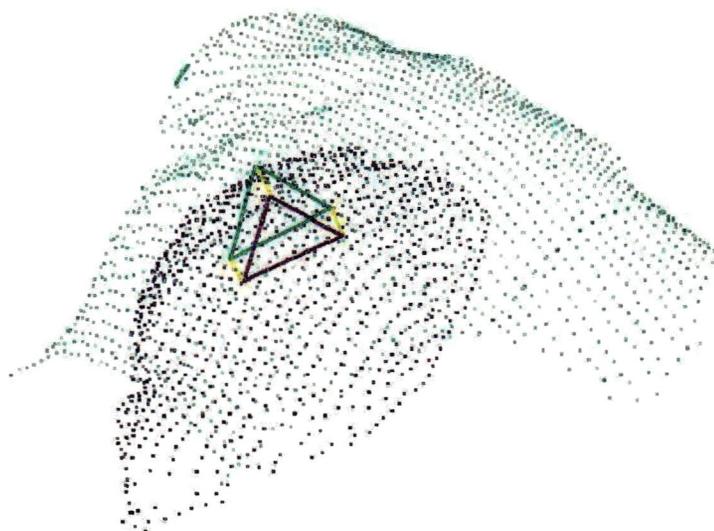


No programa AutoCAD®, as nuvens de pontos das digitalizações externa e interna foram posicionadas corretamente no espaço utilizando os triângulos como referência e as distâncias entre os vértices correspondentes dos triângulos foram

ajustadas segundo as espessuras do crânio previamente medidas. As digitalizações montadas podem ser vistas na Figura 5.49.

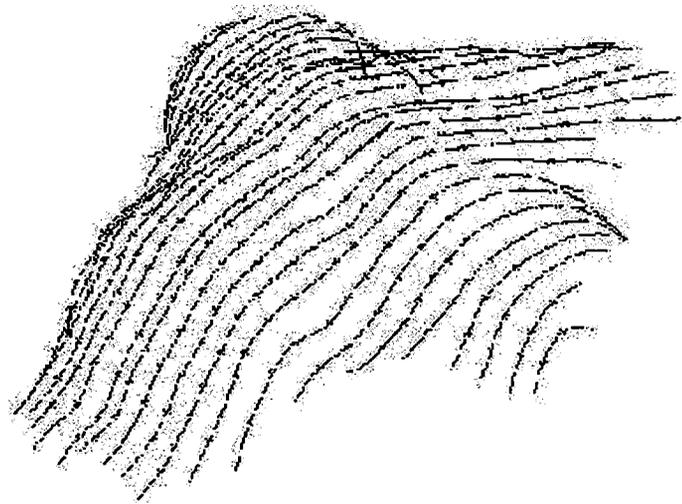
Esta montagem não produziu resultados satisfatórios pois muito embora a distância entre os vértices correspondentes tenha sido ajustada de maneira a terem um desvio máximo de 0,4mm e terem sido comparadas as espessuras em outros pontos do crânio, como nas bordas, visualmente e por diversas vistas as superfícies pareciam desalinhadas. Mesmo assim, o conjunto montado foi exportado no formato .IGS para posterior importação pelo programa ANSYS®.

Figura 5.49 –
Nuvens de
pontos das
digitalizações
externa e
interna
posicionadas
com a
utilização dos
triângulos de
referência.



Inicialmente foi importada para o ambiente ANSYS® apenas a nuvem de pontos da digitalização externa com a finalidade de executar um teste de geração de uma malha com elementos do tipo casca. Se este teste desse certo, seria um indicativo de que a geração de uma malha de elementos sólidos no volume formado pelas superfícies demarcadas pelos pontos das digitalizações externa e interna poderia dar certo. Pelos pontos foram traçadas splines contínuas, conforme mostra a Figura 5.50, e estas curvas foram usadas para a geração de uma área através do comando Skinning do ANSYS®.

Figura 5.50 –
Splines
traçadas
pelos pontos
digitalizados.



Por esta superfície foram feitas várias tentativas de geração automática de uma malha de elementos do tipo casca utilizando diversos tipos de elementos disponíveis no programa com diversas opções de controle de malha e todas elas foram infrutíferas pois em todas as tentativas chegava-se a um ponto em que havia grande distorção na formação dos elementos e o programa acusava diversas advertências para após um bom número delas acusar um erro fatal e paralisar a geração da malha.

Segundo foi julgado, a superfície é muito irregular, contendo inúmeros detalhes que impedem a geração automática da malha de elementos do tipo casca.

Com todos estes problemas e antes mesmo de se tentar gerar uma malha de elementos sólidos, este caminho foi abandonado, mesmo porque existia uma nova alternativa que implicava em simplificar os dados de entrada de modo que fosse facilitada a geração de uma malha de elementos sólidos.

Modelamento do crânio por meio de fatias longitudinais.

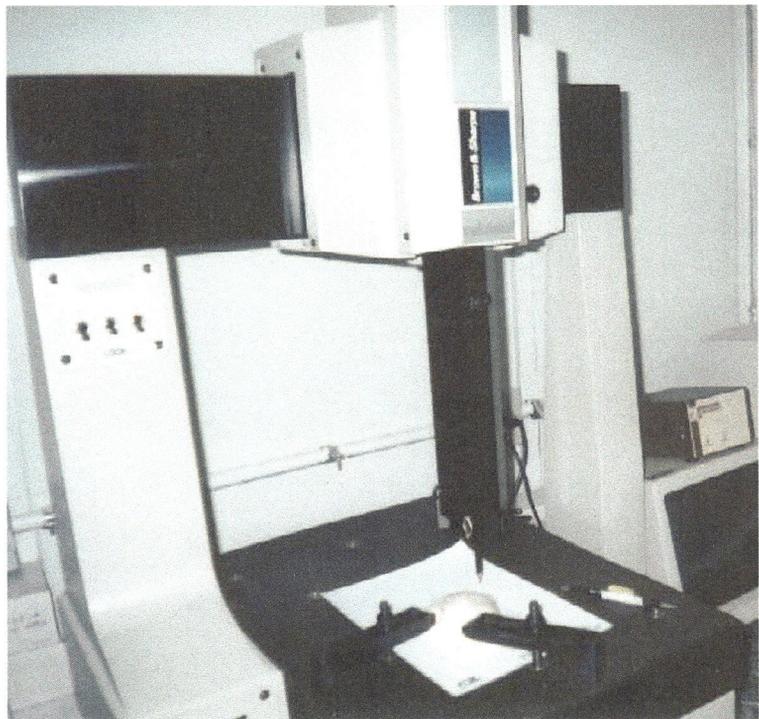
Antes que ocorresse a necessidade de uma nova maneira de digitalizar o volume do crânio para uso pelo programa ANSYS®, queria-se conhecer melhor o comportamento da espessura do crânio ao longo de sua superfície e uma maneira de cumprir tal objetivo seria fatiar, longitudinal ou transversalmente, um

dos modelos em resina do crânio. A necessidade imposta pelo modelamento estimulou esta tarefa.

Escolheu-se primeiramente o fatiamento longitudinal e para tal, um modelo em resina da parte superior do crânio teve sua face plana lixada para regularização e foi posicionado e fixado na mesa da MM3C (Figura 5.51).

Como a parte do crânio que se tem interesse é simétrica em relação ao eixo longitudinal central, será modelada somente metade desta porção do crânio, sendo que a outra metade, será simulada no programa ANSYS® por meio de condições de simetria.

Figura 5.51 –
Marcação das
linhas de
referência
longitudinais
para o corte de
fatiamento de
metade do
modelo em
resina do crânio
do carneiro.



Esta máquina foi utilizada como um traçador e no lugar da sonda de medição foi adaptado um lápis com o qual foram traçadas linhas paralelas e espaçadas de 4,0mm sobre a superfície externa de metade do modelo e no sentido longitudinal. Foi traçada também uma linha transversal na altura do local onde estariam os olhos do animal de modo a permitir a montagem das peças obtidas após o fatiamento.

Em seguida este modelo foi cortado em uma serra de fita da Oficina Mecânica do Laboratório de Máquinas Ferramenta do Departamento de

Engenharia Mecânica da EESC-USP (Figura 5.52). As fatias longitudinais obtidas numeradas de 1 a 23 podem ser vistas na Figura 5.53.

Figura 5.52 – Corte em serra de fita das fatias longitudinais de metade do modelo em resina do crânio do carneiro.



Cada fatia foi escaneada em um *scanner* de mesa para papel e importada, na forma de figura para o Programa AutoCAD®. Neste programa, cada uma delas foi redimensionada para escala natural (1:1) e sobre essa figura foram desenhados por meio de arcos de circunferência e segmentos de reta os perfis externo e interno que se aproximavam da borda da fatia, conforme mostra a Figura 5.54.

Depois de construídos, todos os perfis foram montados também no AutoCAD® colocando-os paralelamente com uma distância de 4,0mm entre cada um de modo a reproduzir a geometria espacial do crânio. Esta montagem foi executada através de uma linha auxiliar na superfície externa e perpendicular a todas as linhas longitudinais construída durante a traçagem na MM3C. Os perfis montados podem ser vistos na Figura 5.55.

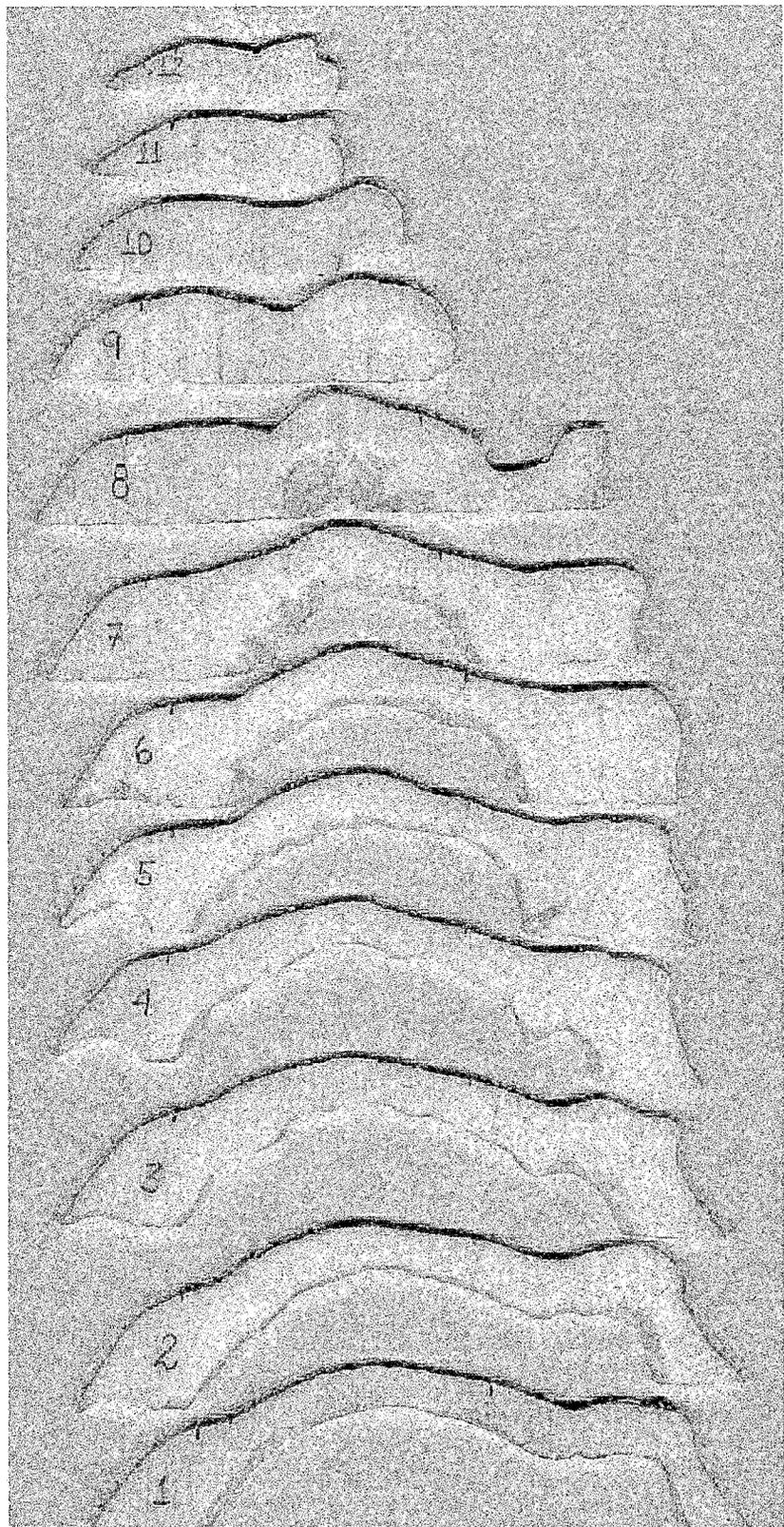


Figura 5.53 – Fatias longitudinais numeradas de 1 a 12 de metade do modelo em resina do crânio do carneiro obtidas pelo corte em uma serra de fita. A fatia 1 é a central e a 12 a do extremo direito.

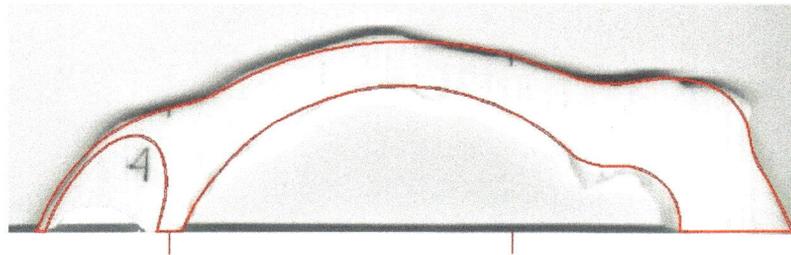
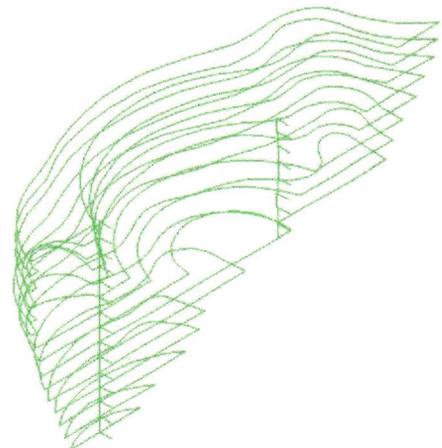


Figura 5.54 – Fatia longitudinal 4 escaneada e importada para o AutoCad® com o perfil desenhado por meio de arcos e segmentos de reta.

Figura 5.55 – Perfis geométricos longitudinais montados modelando de modo simplificado a geometria espacial de metade da parte superior do crânio do carneiro. O perfil da fatia 1 (central) está na parte de cima da Figura e o da fatia 12 (extrema direita) está na parte inferior.



Depois de montados este conjunto de perfis foi exportado, no ambiente AutoCAD® para o formato .IGS e em seguida importado para o ambiente ANSYS®. Neste programa as linhas dos perfis foram agrupadas, quando necessário, geradas novas linhas e geradas áreas convenientes. Foram gerados 24 *Keypoints*, 26 linhas e 14 áreas.

O conjunto de áreas destas foi usado em várias tentativas para a geração de uma malha de elementos do tipo casca com diversas opções de controle de malha. Uma delas utilizando um elemento do tipo casca em regime elástico com

4 nós (Shell 63), para o qual foi usada a opção de construção em triângulos é mostrada na Figura 5.56.

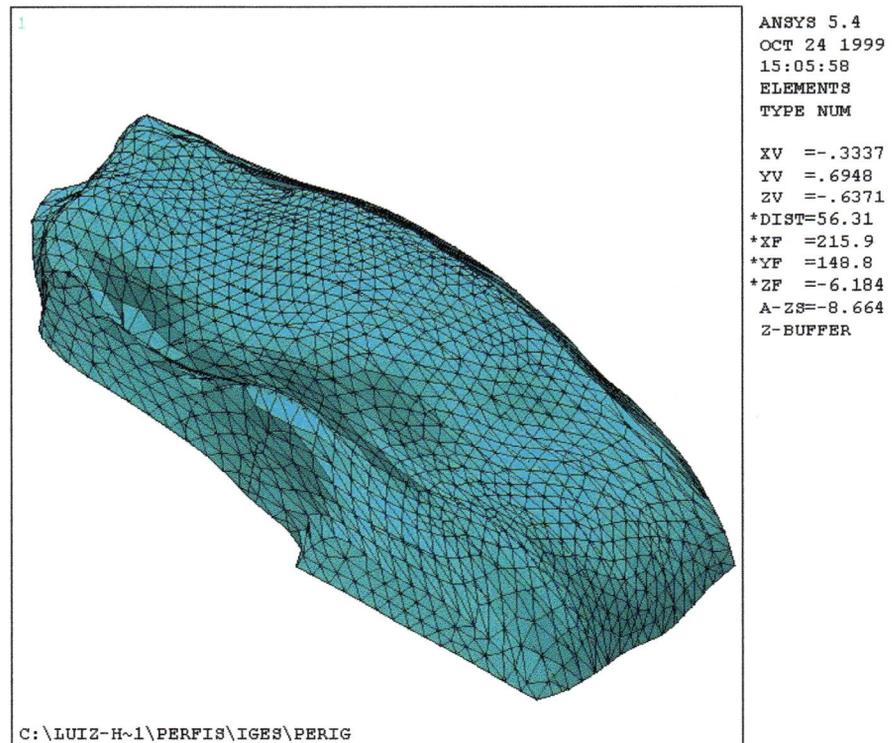


Figura 5.56 – Plotagem de uma das tentativas de geração de elementos com base na geometria espacial de metade da porção superior do crânio do carneiro, obtida com os perfis longitudinais.

Todas as tentativas foram infrutíferas pois os elementos apresentavam distorções excessivas, e após diversas advertências enviadas pelo programa ocorria um erro fatal e a geração da malha era paralisada.

Foram feitas também tentativas infrutíferas de geração de elementos sólidos em volumes de cada fatia gerados através das áreas. O problema apresentado foi o mesmo da malha com elementos do tipo casca, ou seja, os elementos gerados apresentavam excessiva distorção.

Novamente foram buscadas alternativas para simplificar os dados de entrada para que fosse possível executar a geração automática da malha.

Modelamento do crânio por meio de fatias transversais.

O mesmo procedimento utilizado para a obtenção e processamento das fatias longitudinais foi utilizado para a obtenção e processamento das fatias transversais.

Foram executados: a marcação de linhas de referência transversais com uma distância de 5,0mm, o corte em serra de fita, o escaneamento de cada fatia (Figura 5.57), a geração de um perfil com arcos e segmentos de reta sobre cada fatia (Figura 5.58), a montagem de todos os perfis geométricos (Figura 5.59) e a exportação para o programa ANSYS®.

Aqui também foram colhidos dados de metade da porção superior do crânio do carneiro. A outra metade será simulada por meio de condições de simetria do programa ANSYS®.

No programa ANSYS® as linhas dos perfis importados foram agrupadas, foram geradas novas linhas, ajustadas e agrupadas às linhas existentes, geradas áreas convenientes e estas foram usadas para a construção de volumes de modo que cada perfil foi associado com seu adjacente para a reconstrução de cada fatia do volume e o conjunto de volumes se tornou uma aproximação da geometria espacial natural da metade da porção superior do crânio do carneiro.

As primeiras tentativas de geração automática da malha de elementos finitos não foram bem sucedidas e tiveram que ser executadas novas modificações e simplificações do modelo para favorecer essa geração automática.

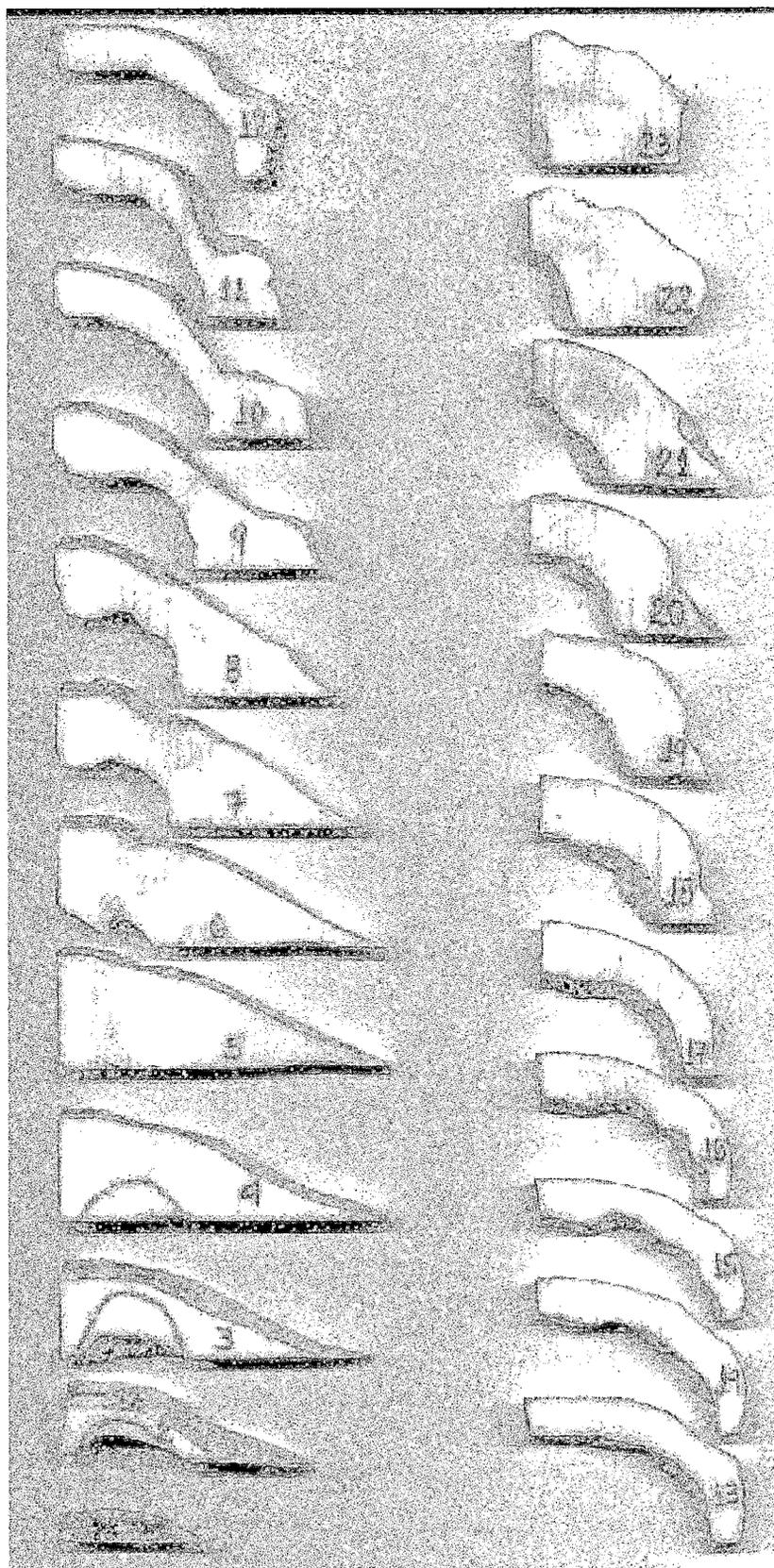


Figura 5.57 – Fatias transversais numeradas de 1 a 23 de metade do modelo em resina da porção superior do o crânio do carneiro obtidas pelo corte em uma serra de fita.

Figura 5.58 – Fatia transversal 9 escaneada e importada para o AutoCad® com o perfil desenhado por meio de arcos de circunferência e segmentos de reta.

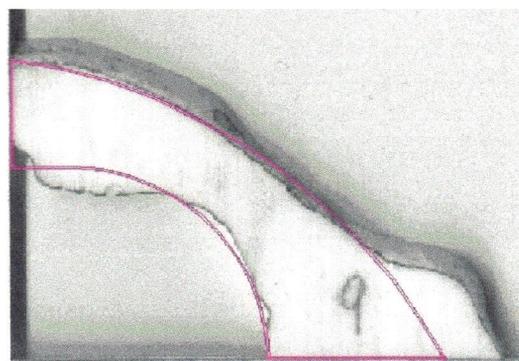
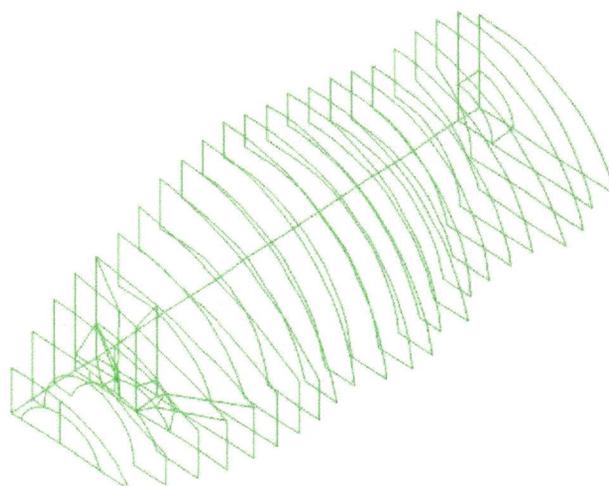


Figura 5.59 – Perfis geométricos transversais montados para a posterior modelagem, de modo simplificado, da metade da geometria espacial da parte superior do crânio do carneiro. O perfil 1 (frontal) está à esquerda da Figura e o 23 (posterior) à direita.



O crânio do carneiro tem na parte frontal de sua porção superior diversas cavidades que são os Sinus Frontais. Na parte do meio do crânio existe uma cavidade que aloja o cérebro do animal. No modelo em construção (metade da porção superior do crânio do animal), os Sinus Frontais foram simulados como sendo uma cavidade semi esférica localizada na parte frontal e a cavidade do cérebro como sendo 1/4 de um ovóide.

O problema para a geração da malha estava na superfície interna, mais precisamente na passagem da cavidade esférica para a ovóide, uma vez que a superfície externa tem um comportamento de transição mais suave.

Para resolver este problema, as principais modificações envolveram a construção de volumes de transição entre a região da frente do crânio (cavidade semi esferoidal) e a região central do crânio (cavidade de 1/4 de um ovóide).

Foram gerados volumes na fatia 5 que compatibilizaram a geração da malha de elementos na parte frontal com a do restante do modelo. Estes volumes são mostrados com a malha já gerada na Figura 5.60.

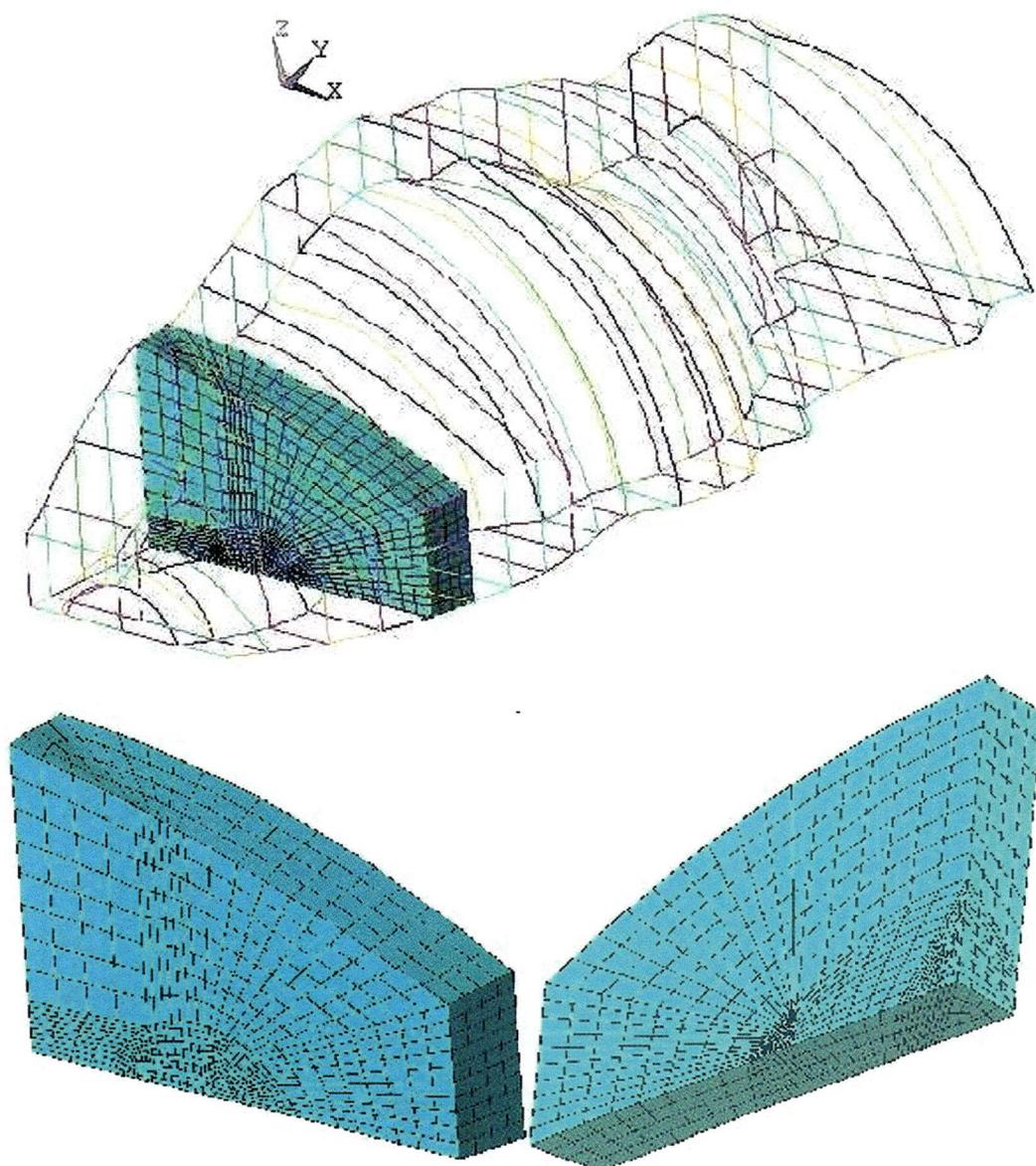


Figura 5.60 – (a) localização da fatia 5 no volume total, (b) malha frontal da fatia 5, (c) malha posterior da fatia 5.

No modelo foi criada, à partir dos volumes definidos na fatia 5, uma pré malha principalmente por meio de volumes hexaédricos bem comportados geometricamente, ou seja, não são regulares mas também não são deformados, que carrega o tipo de distribuição de áreas da parte frontal da fatia 5 até a fatia 1, transformando este padrão em volumes hexaédricos e carrega o tipo de distribuição de áreas da parte posterior da fatia 5 até a fatia 23 transformando este padrão em também em volumes hexaédricos. Nas fatias 1, 23 e na própria fatia 5 foram construídos volumes de fechamento, nem todos hexaédricos, que arrematam a parede da fatia.(Figura 5.61).

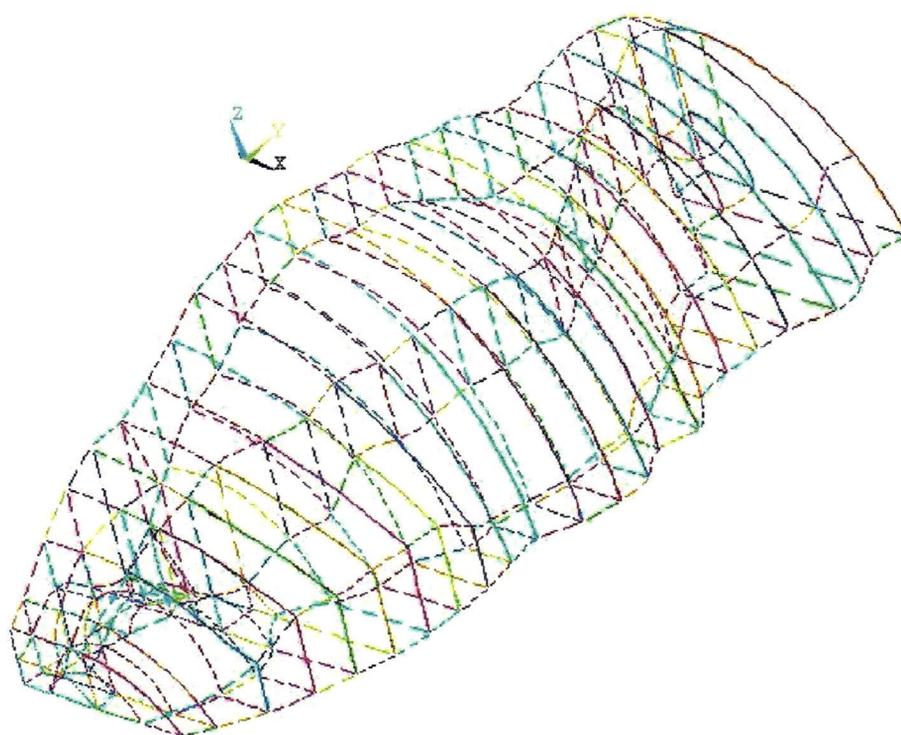


Figura 5.61 – Pré malha mostrada através de linhas pela qual será modelada, por meio de elementos finitos, metade da porção superior do crânio do carneiro. Podem ser vistas as duas fases da pré malha: frontal e posterior.

Quando as superfícies dos volumes à serem gerados continha mais que 6 áreas definidas (normalmente com mais de 6 faces), em todos estes casos as áreas convenientes foram concatenadas antes da geração da malha de elementos finitos para que fossem interpretados como volumes hexaédricos.

A pré malha foi montada com: 63 volumes, gerados à partir de 321 áreas que foram geradas à partir de 456 linhas utilizando 468 *keypoints*.

O tipo de elemento utilizado foi o SOLID 95, definido na biblioteca de elementos do ANSYS® como um elemento estrutural sólido tridimensional hexaédrico de 20 nós com liberdade de deslocamento ao longo dos três eixos coordenados e restrição de rotações nestes eixos (3 graus de liberdade). Foram gerados 8358 elementos sobre 41.584 nós (Figura 5.62)

Gerada a malha, no modelo foram impostas as condições de contorno. Toda a superfície da parte inferior do modelo foi engastada, ou seja foi retirada toda a possibilidade de deslocamento dos nós dessa superfície. À lateral de união com a outra metade da parte superior do crânio do carneiro foi aplicada uma condição de simetria onde todos os deslocamentos em x e y foram restringidos só sendo permitida a movimentação em z (Figura 5.63). Como o elemento usado não permite rotações em torno dos eixos cartesianos, estes graus de liberdade não precisaram ser alterados.

Para as propriedades do material foram utilizados os dados de CLARO NETO (1997), ou seja simulando o material de construção dos corpos de prova dos testes de impacto utilizando o banco de ensaios. O material foi considerado isotrópico com módulo de elasticidade de 1840 MPa e com coeficiente de Poisson de 0,4.

Para o carregamento foi adotado o seguinte raciocínio:

Como foi visto no capítulo 4, para um impulso de 394,3N.s aplicados num intervalo de 0,12s resultou uma força máxima de 9.984,0N, sem prejuízo para o animal.

Nos ensaios de impacto com os crânios (corpos de prova do tipo A), os mesmos suportaram um impulso máximo de 73,9N.s e nos ensaios com o corpo de prova do tipo B o máximo impulso suportado foi de 86,6N.s.

A grande diferença entre os resultados obtidos na natureza com os dos testes de impacto (A e B) – da ordem de 500% - pode ser explicada pelos sofisticados mecanismos de amortecimento de impacto, condições de umidade, e demais fatores encontrados nos animais vivos.

Os valores de máximo impulso para os corpos de prova do tipo A e B estão relativamente próximos, apesar da diferença nos materiais (A-osso versus B-resina) e das condições dos ensaios.

Esta proximidade relativa de resultados (da ordem de 15%) avaliza uma semelhança de comportamento ao impacto dos dois tipos de corpos de prova.

Supondo que o tipo e o intervalo de tempo do impacto nos corpos de prova seja próximo daquele da natureza, pode-se fazer a seguinte aproximação:

$$\frac{I_{\text{nat}}}{I_{\text{ens}}} = \frac{F_{\text{nat}}}{F_{\text{ens}}}$$

Onde:

I_{nat} é o impulso máximo calculado com observações da natureza (Capítulo 3);

I_{ens} é o impulso máximo obtido com nos ensaios com os corpos de prova do tipo B;

F_{nat} é a força máxima calculada com observações da natureza (Capítulo 3) e

F_{ens} é a força máxima que ocorreu nos ensaios com os corpos de prova do tipo F (incógnita)

Assim:

$$F_{\text{ens}} = \frac{86,6}{394,3} * 9.984,0 = 2.192,7\text{N}$$

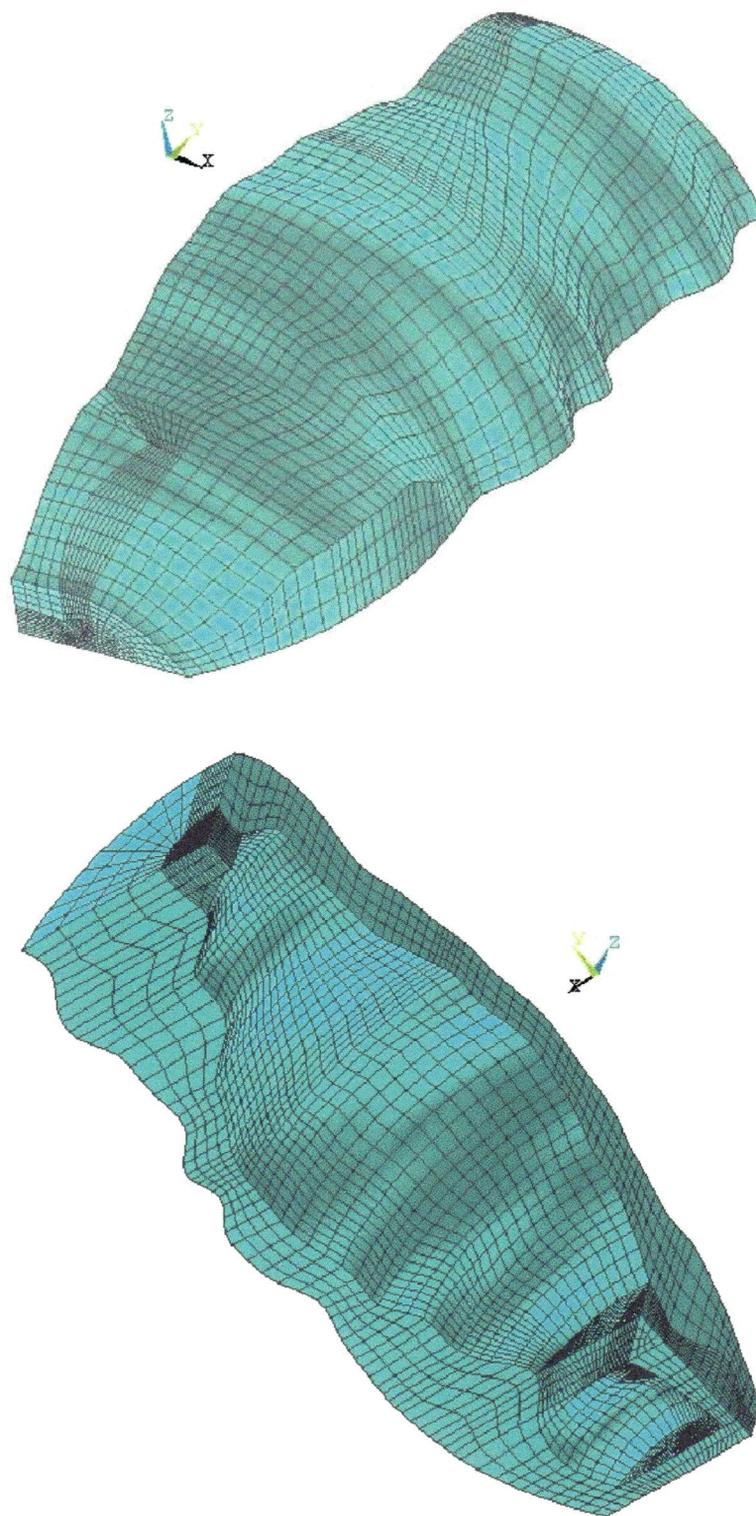
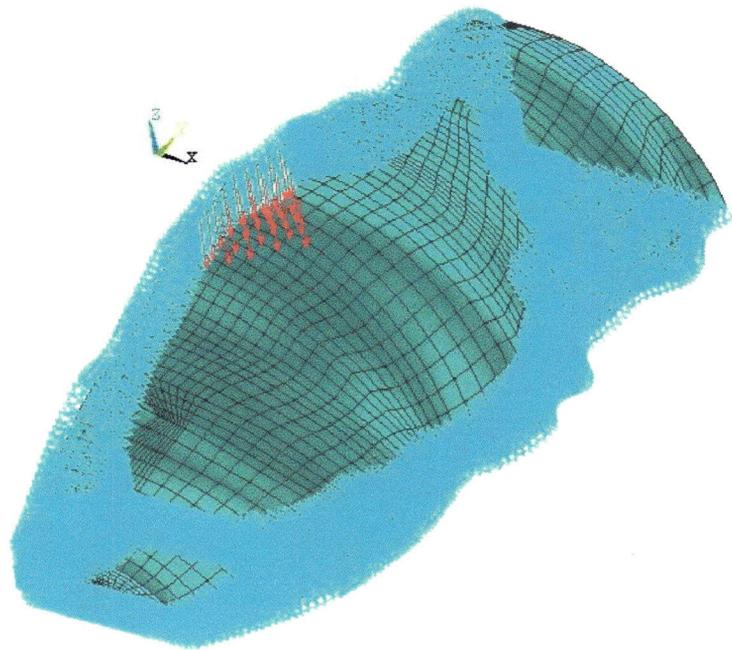


Figura 5.62 – Malha de elementos hexaédricos gerada a opção SOLID 95 do ANSYS®. (a) vista da superfície externa e (b) vista da superfície interna.

Desse modo, a simulação foi executada utilizando um carregamento estático de 2.500,0N (cerca de 15% maior que o estimado) na direção oposta à do eixo Z, distribuídos na forma de um triângulo, conforme a Figura 5.63 em 25 nós localizados na parte superior do modelo na mesma região onde na natureza os carneiros recebem os impactos, sendo que em cada nó a carga aplicada foi de 100,0N. Este triângulo tem 9 nós na base (linha de simetria) e progride na direção do eixo X (borda do modelo) com carregamentos em 7, 5, 3 e 1 nó.

O carregamento reflete a pior condição que poderia ser atingida se fosse feito um carregamento transiente com as cargas partido de 0,0N sendo gradativamente aumentada até ser atingido o valor máximo. Como o interesse desta simulação é o de verificar o comportamento das tensões na peça na pior situação, o carregamento estático com um valor extremo da força fornecerá os resultados que se procura.

Figura 5.63 –
Condições de
contorno
impostas no
modelo:
engastamento,
simetria e forças
estáticas.



O objetivo desta simulação foi o de verificar o comportamento das tensões na geometria espacial do modelo para daí serem obtidos indicativos de como a forma do crânio do animal resiste a carregamentos e quais as regiões onde este desempenho é melhor.

Como resultados desta simulação para a solução nodal são:

- O contorno da distribuição de tensões na direção X, que podem ser vistas na Figuras 5.64 para a superfície externa e na Figura 5.65 para a superfície interna,
- O contorno da distribuição de tensões na direção Y, que podem ser vistas na Figuras 5.66 para a superfície externa e na Figura 5.67 para a superfície interna,
- O contorno da distribuição de tensões na direção Z, que podem ser vistas na Figuras 5.68 para a superfície externa e na Figura 5.69 para a superfície interna e
- O contorno da distribuição de tensões de von Mises, que podem ser vistas na Figuras 5.70 para a superfície externa e na Figura 5.71 para a superfície interna.

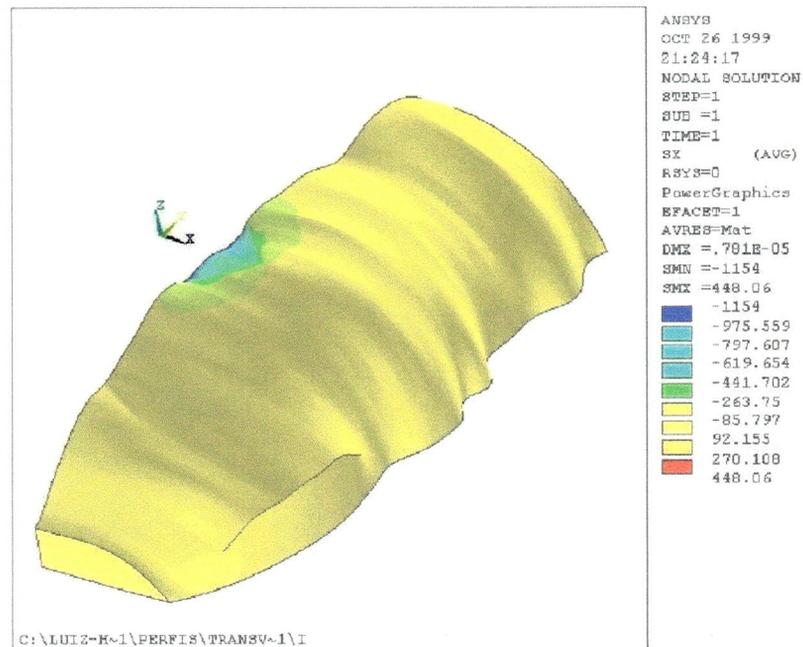
Considerações sobre os resultados do Modelamento por Elementos Finitos.

Mesmo sendo o modelo obtido bastante simplificado em relação a geometria espacial natural, os resultados obtidos com as Figuras de 5.64 a 5.71 vieram ao encontro do que já havia sido percebido até o momento.

Tensões de valor elevado de compressão no lado externo e de tração no lado interno ocorrem na região do carregamento, justamente onde o osso parietal tem maior espessura.

Tensões de tração na direção Y (Figura 5.66) de valor mediantemente elevado ocorrem nas laterais localizadas no meio da peça, justamente a região onde na natureza encontramos suturas e onde alguns corpos de prova do tipo B se romperam após ensaios (fratura em estrela de 3 pontas).

As tensões nas regiões posterior e frontal do modelo apresentam valores baixos.



Figuras 5.64 - Contorno da distribuição de tensões na direção X na superfície externa. A escala colorida do lado direito da Figura indica as tensões de tração (sinal positivo) e de compressão (sinal negativo) em 10^{-1} Pascal [10^{-1} MN/mm²] ou [10^{-1} N/ m²].

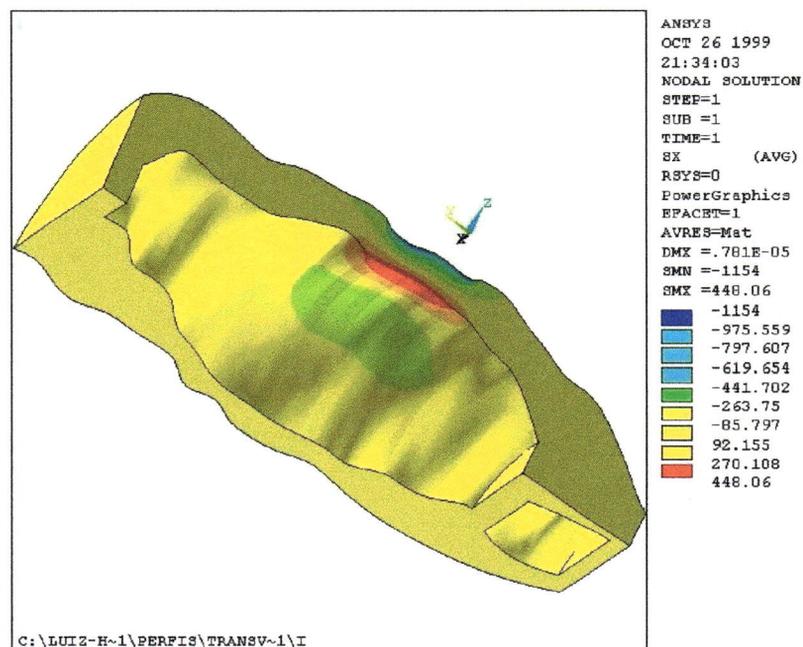
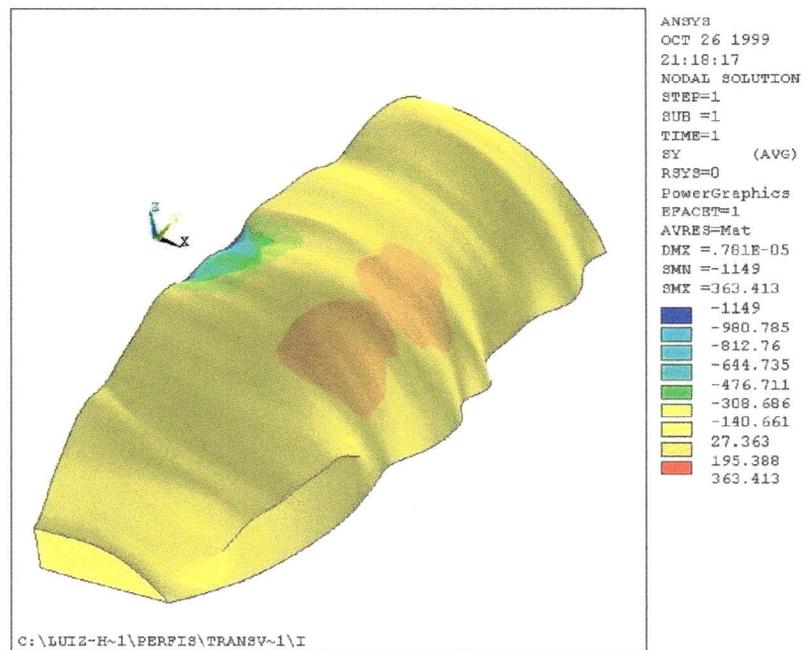


Figura 5.65 - Contorno da distribuição de tensões na direção X para a superfície interna. A escala colorida do lado direito da Figura indica as tensões de tração (sinal positivo) e de compressão (sinal negativo) em 10^{-1} Pascal [10^{-1} MN/mm²] ou [10^{-1} N/ m²].



Figuras 5.66 - Contorno da distribuição de tensões na direção Y na superfície externa. A escala colorida do lado direito da Figura indica as tensões de tração (sinal positivo) e de compressão (sinal negativo) em 10^{-1} Pascal [10^{-1} MN/mm²] ou [10^{-1} N/ m²].

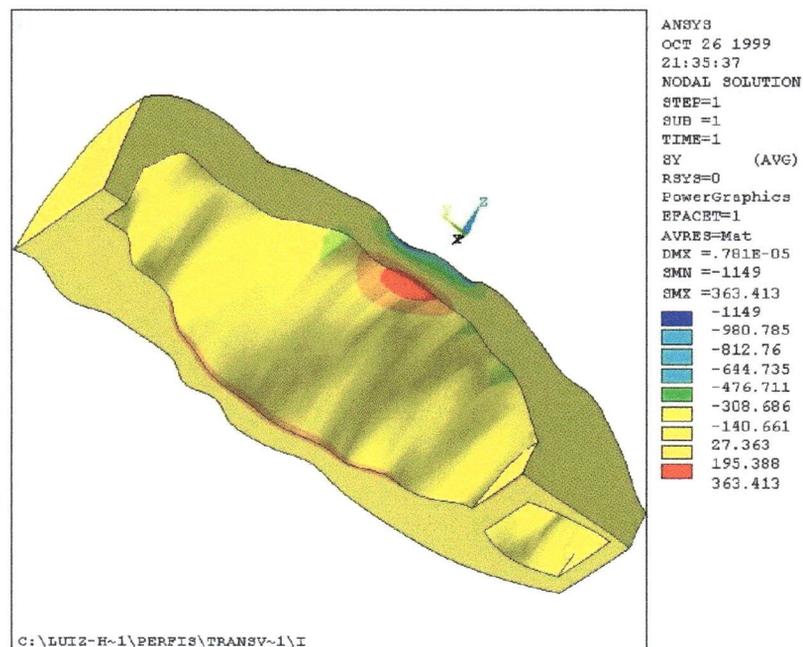
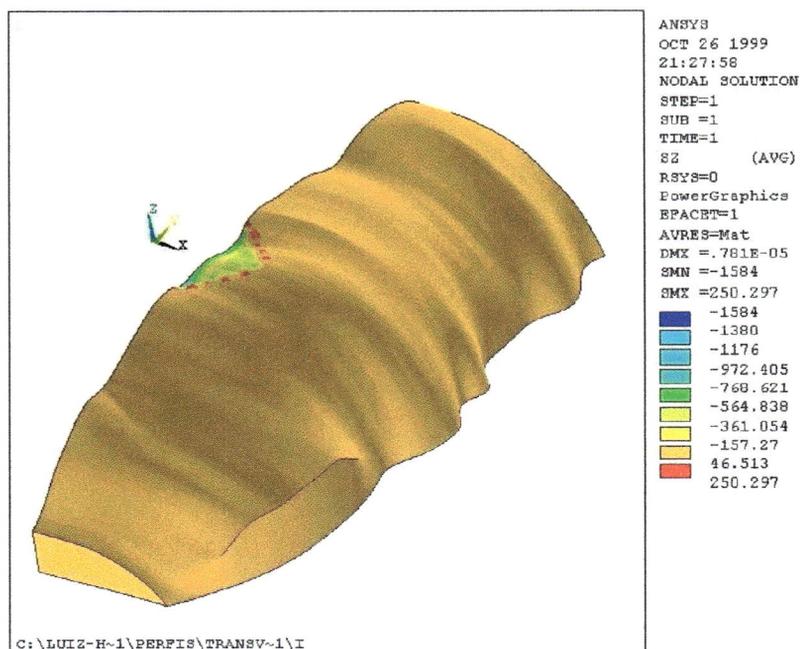


Figura 5.67 - Contorno da distribuição de tensões na direção Y para a superfície interna. A escala colorida do lado direito da Figura indica as tensões de tração (sinal positivo) e de compressão (sinal negativo) em 10^{-1} Pascal [10^{-1} MN/mm²] ou [10^{-1} N/ m²].



Figuras 5.68 - Contorno da distribuição de tensões na direção Z na superfície externa. A escala colorida do lado direito da Figura indica as tensões de tração (sinal positivo) e de compressão (sinal negativo) em 10^{-1} Pascal [10^{-1} MN/mm²] ou [10^{-1} N/ m²].

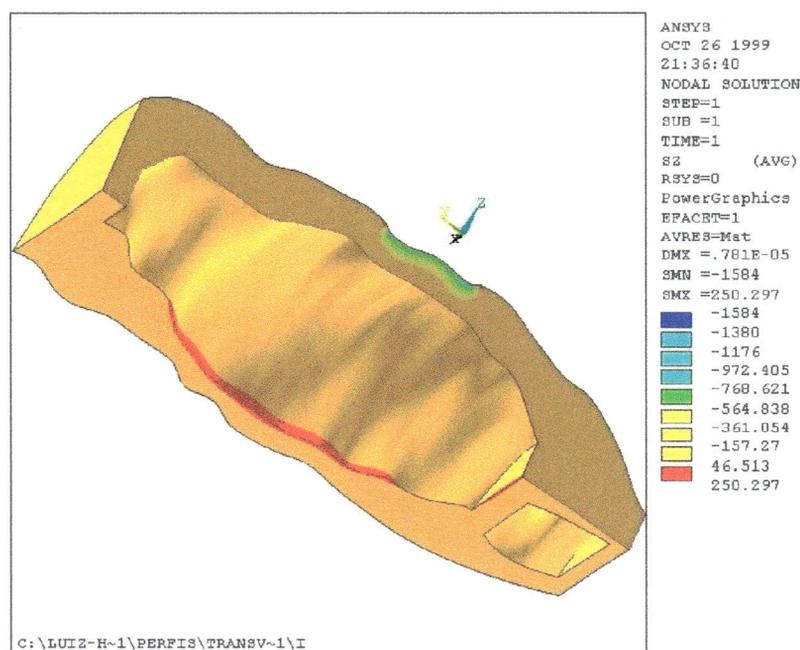
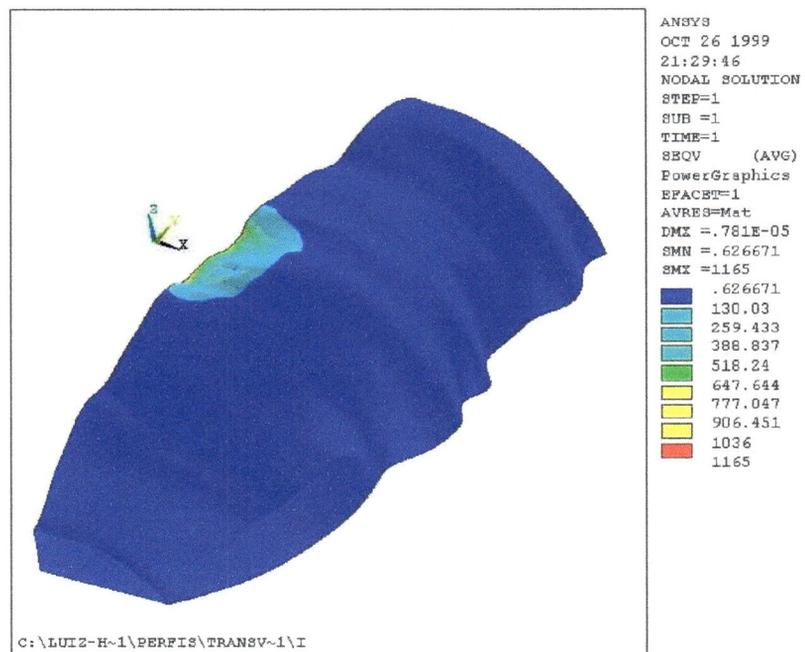
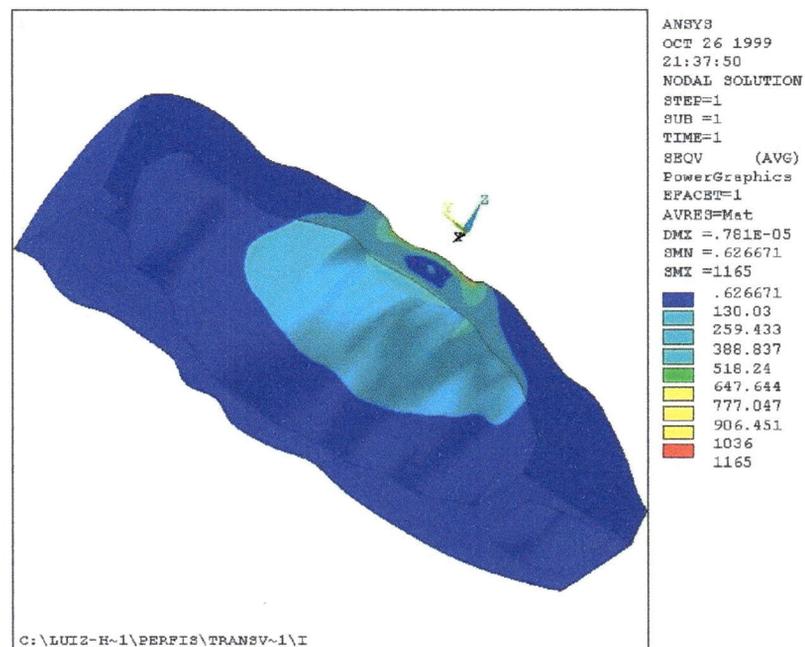


Figura 5.69 - Contorno da distribuição de tensões na direção Z para a superfície interna. A escala colorida do lado direito da Figura indica as tensões de tração (sinal positivo) e de compressão (sinal negativo) em 10^{-1} Pascal [10^{-1} MN/mm²] ou [10^{-1} N/ m²].



Figuras 5.70 - Contorno da distribuição de tensões de von Mises na superfície externa. A escala colorida do lado direito da Figura indica as tensões em 10^{-1} Pascal [10^{-1} MN/mm²] ou [10^{-1} N/ m²].



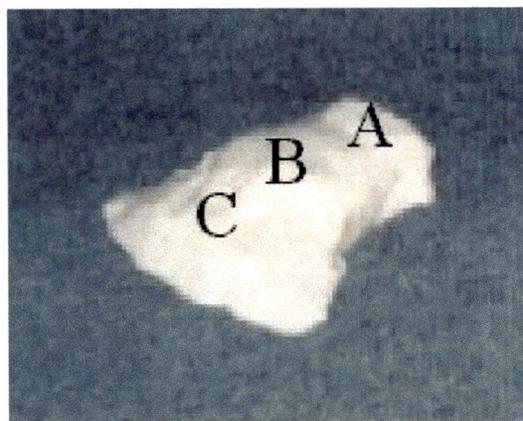
Figuras 5.71 - Contorno da distribuição de tensões de von Mises na superfície interna. A escala colorida do lado direito da Figura indica as tensões em 10^{-1} Pascal [10^{-1} MN/mm²] ou [10^{-1} N/ m²].

6 – PRINCÍPIOS SUGERIDOS PELA NATUREZA EM FACE DE UM IMPACTO

Durante as diversas fases do trabalho com a geometria espacial do crânio do carneiro – natural e modelada - buscou-se, de modo semelhante ao que MATTHECK (1995) fez para as árvores (ver anexo A), uma compreensão do comportamento do crânio quando submetido a carregamentos estáticos e de impactos. Esta compreensão poderia indicar um princípio de “funcionamento” de modo que este gerasse um modelo geométrico que pudesse ser reproduzido através de processos de fabricação relativamente simples e que garantisse resistência ao impacto.

Depois do corte da parte superior do crânio do carneiro, utilizada para a execução da digitalização da superfície interna também como matriz para a execução do molde em silicone, esta peça foi analisada. Foi notado que a mesma, conforme a Figura 6.1, tem três regiões geometricamente distintas (A, B e C). Estas regiões têm resistência e distribuição de tensões diferenciadas conforme pôde ser avaliado pelos ensaios no banco de ensaios e utilizando o método dos elementos finitos, respectivamente:

Figura 6.1 – Foto do crânio em perspectiva mostrando as regiões A, B e C.

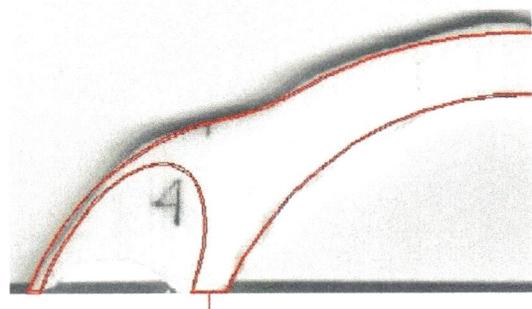


Região A – A parte posterior do crânio desta peça (perfis 17 a 23 da Figura 5.56) é bastante robusta tanto na geometria quanto na espessura óssea. Nos testes de impacto ela se mostrou bastante resistente, não rompendo e na simulação por elementos finitos essa região se mostrou livre de tensões elevadas.

Região B – As laterais desta peça, na região onde ocorrem os impactos, tem perfis com aspecto semi circular e menores espessuras (perfis de 9 a 15 da Figura 5.56) aparentando fragilidade. Nos testes de impacto se mostrou bastante frágil, rompendo com relativa facilidade e na simulação por elementos finitos nessa região foram detectadas tensões relativamente elevadas (Figuras 5.65 e 5.66 – tensões na direção Y). Esta fragilidade é compensada na natureza pela presença de suturas entre as placas ósseas que se encontram nesta região e que segundo GUAZZELLI FILHO (1999) podem atenuar as tensões que aí ocorrem

Região C – A parte frontal da peça, que também é submetida a impactos (perfis de 1 a 8 da Figura 5.56), com perfil que se assemelha a um “Y” deformado e invertido (Figura 6.2) devido à presença dos Sinus Frontais, também aparentava fragilidade. Nos teste de impacto se mostrou relativamente resistente e na simulação por elementos finitos apresentou relativamente baixas tensões.

Figura 6.2 – Perfil da parte frontal da fatia 4 do modelo em resina da parte superior do crânio do carneiro. Trata-se da Figura 5.53 modificada.



Estas duas últimas regiões (B e C) aparentemente embutem princípios para resistência à impactos.

6.1 – Princípios Sugeridos pela Região Central do Crânio (Região B)

Nesta região, conforme foi verificado através dos resultados dos ensaios com os corpos de prova, ocorrem tensões relativamente elevadas. Nesta mesma região e nos exemplares naturais, existe uma união entre as placas ósseas classificada como uma articulação fibrosa denominada sutura serrata (ou serrátil) (GETTY, 1981 e WARWICK, 1979) que segundo consulta a GUAZZELLI FILHO (1999) pode ser um mecanismo de atenuação de tensões.

Esta disposição pode ser considerada um dos princípios procurados e pode ser usado na construção de uma superfície constituída de placas de compósitos (como se pode considerar o osso) unidas por um sistema fibroso semelhante às referidas suturas. Um esquema da estrutura geral de uma sutura é mostrado na Figura 6.3.

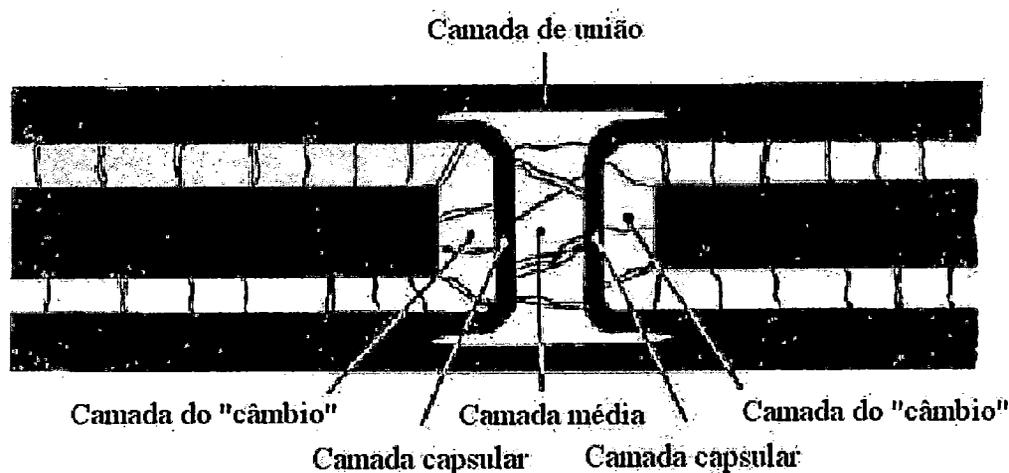


Figura 6.3 – Estrutura geral de uma sutura. Observe as cinco camadas que se interpõem entre as extremidades ósseas: “câmbio”, capsular, média, capsular e “câmbio”. As camadas do câmbio capsular são contínuas com as camadas similares nas faces interna e externa dos ossos, enquanto os extratos fibrosos superficiais do periósteo atravessam a sutura como camadas de união (WARWICK, 1979)

Para ficar mais clara a anatomia deste tipo de articulação fixa, será transcrito abaixo o texto de WARWICK (1979). As observações entre parênteses e os grifos tem relação direta com o presente trabalho.

“... Desde que todos os ossos se ossificam em tecido fibroso ou cartilagem pré-existentes, estes dois tecidos aparecem inevitavelmente nas uniões tais como suturas e sincondroses, onde elementos esqueléticos separados ainda estão em processo de crescimento. As verdadeiras margens ou superfícies ósseas se aproximam gradualmente e, quando cessa o crescimento, o tecido de união é suprimido, levando à completa continuidade óssea. Tais juntas são portanto temporárias e embora o fechamento das suturas seja retardado em relação à fusão das epífises, ele é finalmente completado na maioria dos casos. ...

... As suturas são limitadas ao crânio, ocorrendo onde quer que margens ou superfícies mais largas de ossos se encontrem e se articulem, separadas somente por uma zona de tecido conjuntivo, ligamento sutural ou membrana. Esta é a parte não ossificada que permanece da lâmina mesenquimal na qual se desenvolvem os ossos dérmicos.

O ligamento sutural não é simples (ver a Figura 6.3 do presente trabalho), mostrando regiões de diferenciação relativas ao crescimento e união das superfícies ósseas justapostas. Cada osso está coberto na sua face sutural por uma camada de células osteogênicas um tanto achatadas - a camada do “câmbio” de alguns observadores - que é, ela mesma, revestida por uma lamela de tecido fibroso.

Estas duas camadas juntas correspondem ao perióstio e são contínuas com este nas margens das superfícies suturais, tanto dentro como fora do crânio. Entre estas duas camadas de perióstio

sutural há um estrato central de tecido conjuntivo fibroso disposto frouxamente, cuja largura varia conforme o intervalo entre os ossos participantes.

Esta região central do ligamento sutural contém vasos sanguíneos de paredes finas, cujas veias se comunicam com vasos diplóicos e seios venosos intracranianos e com veias externas tais como aquelas do couro cabeludo. O elemento fibroso no periósteo aderente às superfícies dos ossos adjacentes, ligados por uma sutura, atravessa o intervalo entre eles, fechando assim o ligamento sutural e aumentando seu efeito de união.

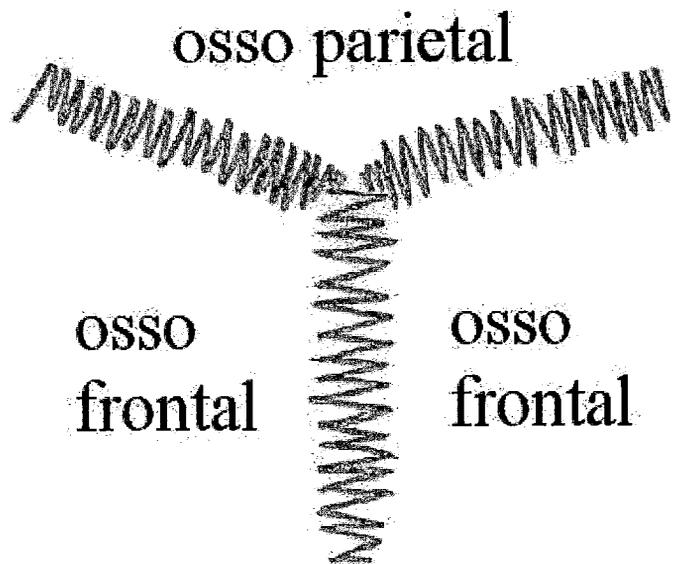
Em vista da ocorrência de manchas de tecido fibroso em sincondroses, é de considerável interesse constatar que durante o período de crescimento áreas de formação de cartilagem secundária são observadas freqüentemente nos ligamentos suturais, uma evidência maior do íntimo relacionamento entre articulações fibrosas e cartilagíneas.

Quando o crescimento das suturas chega ao fim, as células osteogênicas realizam a completa transformação do ligamento sutural em osso, um processo que é lento, mas finalmente leva à obliteração e, naturalmente, à rígida sinostose. A união sutural só começa mesmo no final da casa dos vinte anos (para seres humanos), processando-se lentamente daí em diante; ainda é claramente necessário que as suturas devam cessar a função como articulações móveis, tão rapidamente quanto possível depois do nascimento. Embora ligamentos suturais possam ser suficientes para efetuar uma ligação imóvel entre grandes áreas de ossos, especialmente onde estas apresentam irregularidades adaptadas reciprocamente, mesmo que estas sejam tão finas como nas junções entre as duas maxilas, nenhuma imobilidade semelhante é de se esperar nas articulações estreitas nas margens dos ossos da abóbada craniana. Em suturas tais como estas, entretanto, as margens dos

ossos tornam-se altamente complexas e irregulares, desenvolvendo espinhas e recessos que se engrenam tão intimamente, que pode ser difícil separar os ossos, mesmo quando retirado todo o tecido conjuntivo.”

As suturas podem ser do tipo serrátil (ou serrata), dentada (ou folheada), escamosa e plana (GETTY, 1981 e WARWICK, 1979). No caso do crânio do carneiro o tipo de sutura encontrado na união do osso parietal com seus vizinhos (occipital, frontais, interparietal e temporal) é do tipo serrata que tem as margens semelhantes a uma serra ou serrilhada (Figura 6.4)

Figura 6.4 – Vista superior (em planta) das suturas serrata observadas no crânio do carneiro. Os ângulos entre as suturas correspondem aos observados. O osso parietal situa-se na parte posterior do crânio.



Do texto citado acima pôde-se compreender que as suturas das placas ósseas do crânio dos animais sofrem um longo processo de solidificação sendo que em indivíduos jovens elas permitem certa mobilidade devido à presença de tecidos fibrosos que aos poucos vai sendo restringida. O processo de total ossificação tem início na fase adulta e progride durante o desenvolvimento e envelhecimento do animal tornando as uniões cada vez mais rígidas.

Este pode ser, no caso dos carneiros, um mecanismo de seleção natural de reprodutores. Quando muito jovens não resistem a grandes impactos pois as suturas são relativamente móveis (caso semelhante ocorre com os humanos recém nascidos que tem a chamada “moleira” na parte superior do crânio) e seus músculos do pescoço ainda não estão totalmente desenvolvidos. Quando muito velhos as suturas estão completamente solidificadas diminuindo a pouca flexibilidade das suturas e também seus músculos do pescoço já não tem o mesmo vigor da fase adulta.

O material bibliográfico encontrado até o momento não diz claramente que as suturas permitem pequenos movimentos nem que não os permitem. Pelo que pode ser entendido, crê-se que pequenos deslocamentos podem ocorrer.

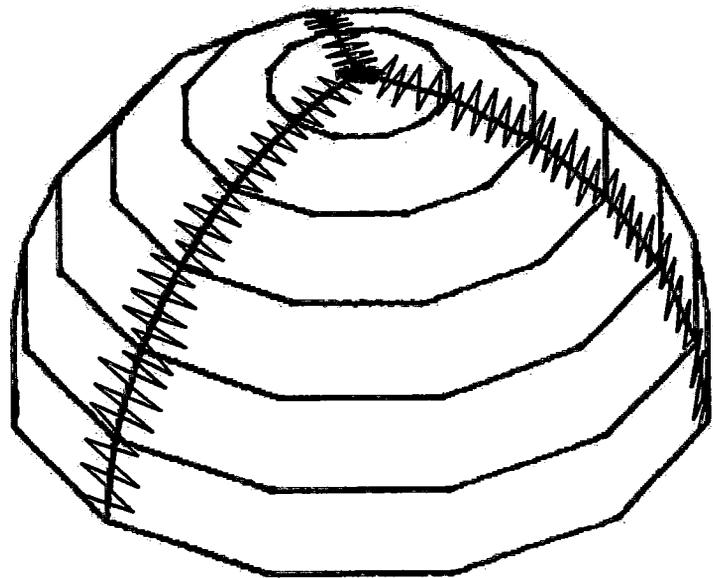
Pelo que se observou até o momento não existe nem na natureza nem nos sistemas artificiais um material, geometria ou sistema que seja por si só completamente imune a danos devidos à impactos. O que salva as estruturas de maiores danos é o amortecimento.

Desse modo, as suturas no crânio dos carneiros –assim como ocorre com os músculos do pescoço - podem funcionar como um sistema de amortecimento e distribuição de tensões localizadas devidas a impactos. Este sistema alivia danos que poderiam ser provocados no localmente, distribuindo a energia e as tensões por uma região mais extensa do crânio do animal.

Este princípio de “funcionamento” poderia ser aplicado em peças submetidas a esforços concentrados, ou seja, a construção de uma união com uma grande superfície de contato (“sutura serrátil”) unida por uma cola, solda ou sistema de união fibroso que permitisse pequenos deslocamentos sem prejuízo da integridade do material de união nem do material que está sendo unido.

Uma possível proposta para uma estrutura usando uma geometria espacial semi esférica - que lembra a forma da parte superior de um crânio - e uma disposição espacial das uniões que também lembram as suturas encontradas no topo do crânio do carneiro em estudo é mostrada na Figura 6.5

Figura 6.5 –
Proposta de
aplicação:
Calota esférica
montada à partir
de 3 peças
iguais unidas
por uma união
do tipo sutura
serrata.



6.2 – Princípios Sugeridos pela Região Frontal do Crânio (Região C)

6.2.1 - Determinação de um Perfil Leve e Resistente.

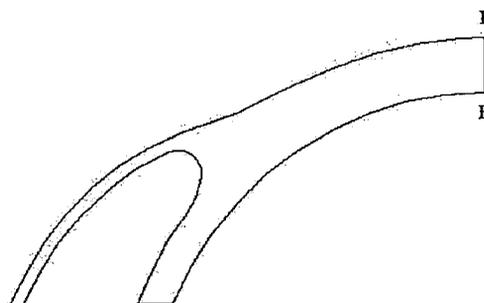
O paradoxo entre a aparente fragilidade e a resistência relativamente elevada da região C (frontal), com um de seus perfis mostrado pela Figura 6.2 também foi notado e induziu a suposição de que nesta região poderia residir o princípio geométrico procurado que compreenderia uma estrutura leve e resistente a impactos.

Desse modo pareceu razoável imitar este perfil, dentro das limitações impostas pelas ferramentas, materiais e tecnologias disponíveis, e utilizá-lo no desenvolvimento de um modelo sólido tridimensional.

De todos os perfis longitudinais mostrados pela Figura 5.52 (perfis longitudinais), aquele que se sobressaiu como futuro candidato a ser um gerador de um padrão foi o perfil 4. Como a parte de interesse neste perfil completo é a frontal, decidiu-se que o mesmo seria cortado justamente na região que recebe o impacto como já foi visto anteriormente e após uma geometrização deste perfil

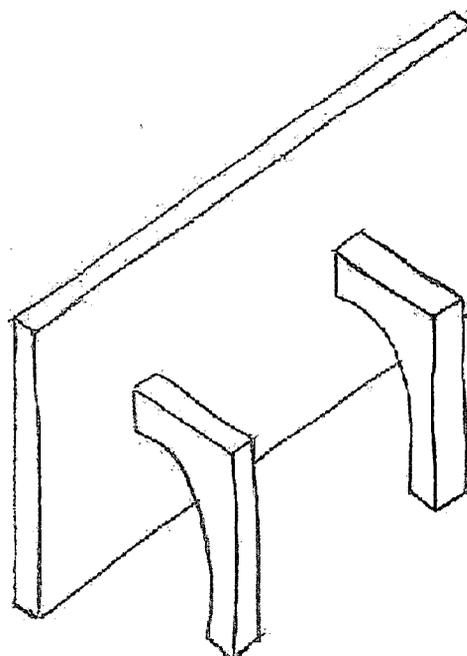
com segmentos de reta e arcos de circunferência obteve-se o perfil mostrado pela Figura 6.6.

Figura 6.6 – Perfil utilizado na geração das superfícies de revolução e extrusão.



É interessante notar que esta a forma deste perfil lembra um tipo de construção usado na arquitetura quando os materiais de construção e de união não são muito resistentes. Particularmente os arquitetos medievais utilizavam este tipo de recurso quando necessitavam fazer paredes altas com grandes vãos que deveriam suportar carregamentos elevados, ou seja, escoravam estas paredes com paredes menores que partindo de uma certa altura da parede alta a reforçasse (Figura 6.7).

Figura 6.7 – Esquema de uma construção utilizando pilares de escora.



6.2.2 – Construção de Modelos Plásticos Utilizando Prototipagem Rápida.

Após a preparação deste perfil, no programa AutoCAD® o mesmo foi rotacionado em torno do eixo de corte (E-E – Figura 6.6) resultando no sólido geométrico tridimensional mostrado na Figura 6.8

Este perfil, também utilizando o AutoCAD®, foi espelhado com relação ao mesmo eixo de corte (E-E) e em seguida, no mesmo programa foi extrudado com uma extensão de 150mm gerando um sólido tridimensional mostrado pela Figura 6.9

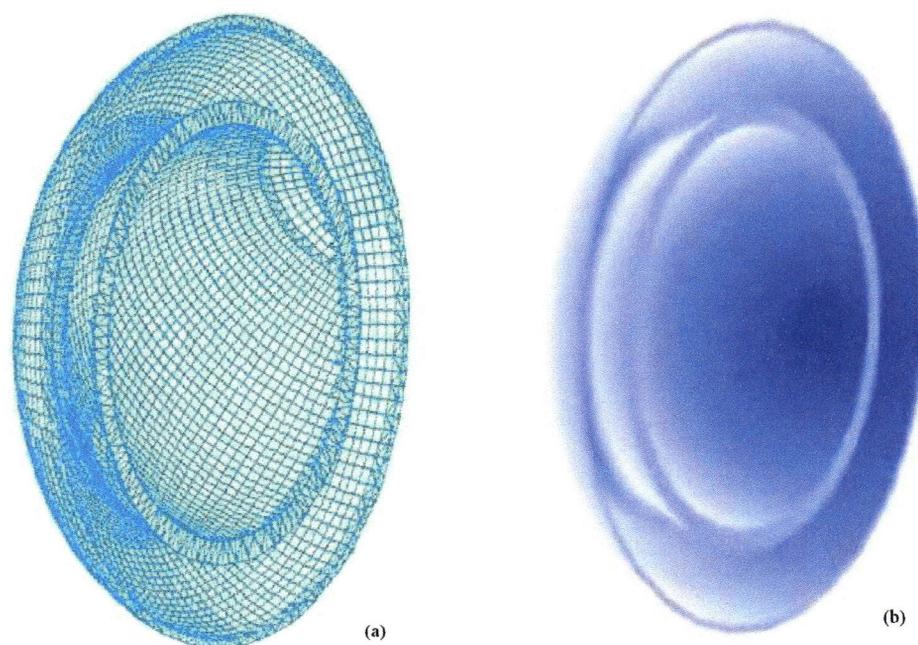


Figura 6.8 – Sólido geométrico tridimensional gerado à partir da rotação do perfil mostrado na Figura 6.6. (a) representação em estrutura aramada; (b) representação com sombra/luz.

Ambos os modelos sólidos virtuais foram exportados no formato .STL adequado para a reprodução utilizando máquinas de prototipagem rápida.

Estes arquivos foram utilizados na construção de duas peças, uma rotacionada e outra extrudada, utilizando o processo FDM – Fused Deposition

Modelling (Modelamento por Deposição de Material Fundido) utilizado pela máquina de prototipagem rápida da marca Stratasys modelo FDM 8000 (Figura 6.10) de propriedade do Núcleo de Prototipagem Rápida da Fundação Parque de Alta Tecnologia de São Carlos (ParqTec).

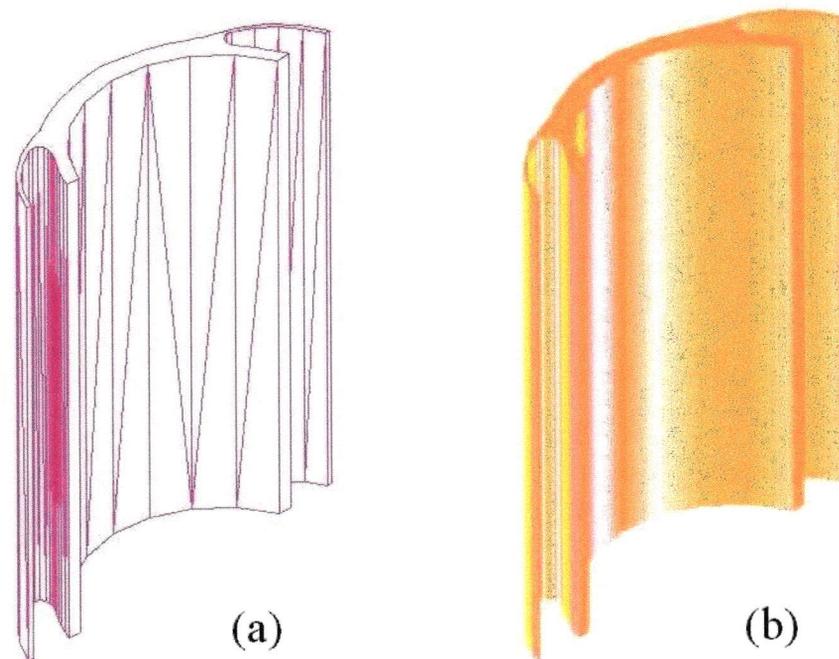


Figura 6.9 - Sólido geométrico tridimensional gerado à partir do espelhamento e extrusão do perfil mostrado na Figura 6.6. (a) representação em estrutura aramada; (b) representação com sombra/luz.

Figura 6.10 – Máquina de prototipagem rápida pelo processo “Fused Deposition Modeling” da marca Stratasys, modelo FDM 8000.



Este processo consiste na construção de um sólido camada por camada através da deposição de um material plástico fundido na forma de um fio feita

por um cabeçote aquecido, alimentado por um rolo de fio não plastificado. Este cabeçote com movimentos no plano horizontal é guiado por um sistema de transmissão motorizado comandado por computador, assim como o são os movimentos verticais da mesa da máquina.

Através de um programa de computador da própria Stratasys, é lido um arquivo com extensão .STL que contém o modelo sólido tridimensional virtual. Em seguida este programa é comandado para fatiar este modelo e gerar os caminhos que serão percorridos pelo cabeçote para gerar a peça sólida.

A Figura 6.11 mostra o modelo virtual (rotacionado) da Figura 6.8 fatiado, bem como a tela do programa. Nota-se que o sólido foi construído com a parte externa da calota apoiada sobre uma base (também construída por FDM) apoiada sobre a mesa da máquina. A Figura 6.12 mostra um exemplo de caminhos gerados pelo programa para este sólido para uma porção central do mesmo.

A Figura 6.13 mostra o modelo virtual (extrudado) da Figura 6.9 fatiado e a Figura 6.14 um exemplo de caminhos gerados pelo programa para este sólido.

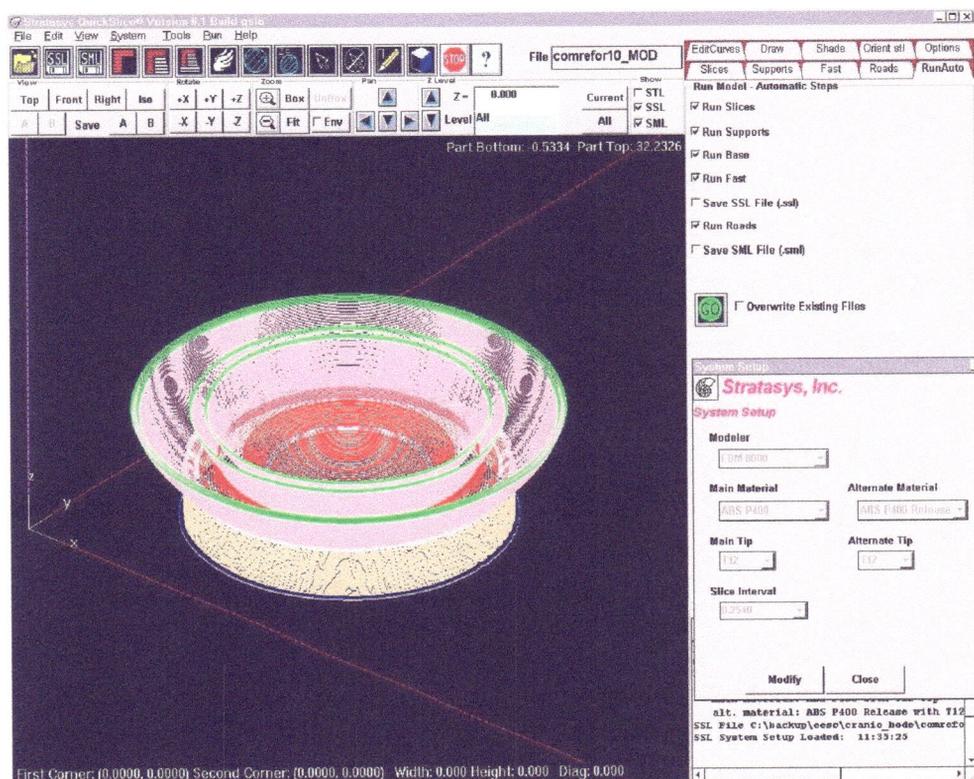


Figura 6.11 – Fatiamento do modelo da Figuras 6.8 juntamente com a tela do programa utilizado.

Figura 6.12 – Exemplo de um caminho gerado pelo programa para uma fatia do meio do modelo da Figura 6.8.

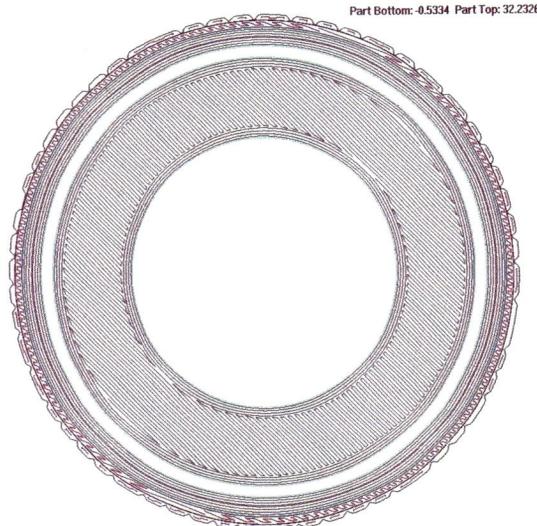


Figura 6.13 – Fatiamento do modelo da Figura 6.9.

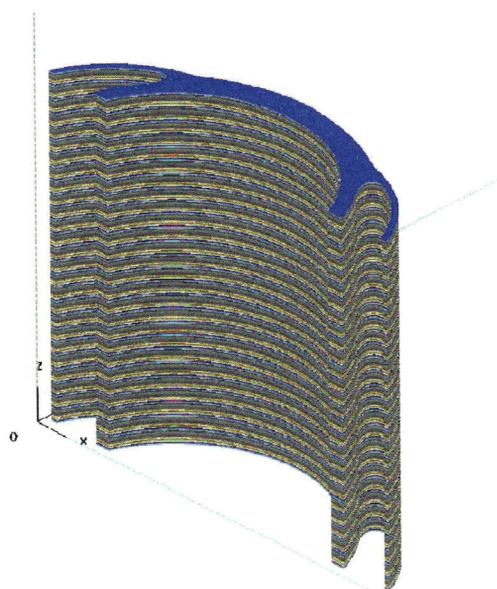


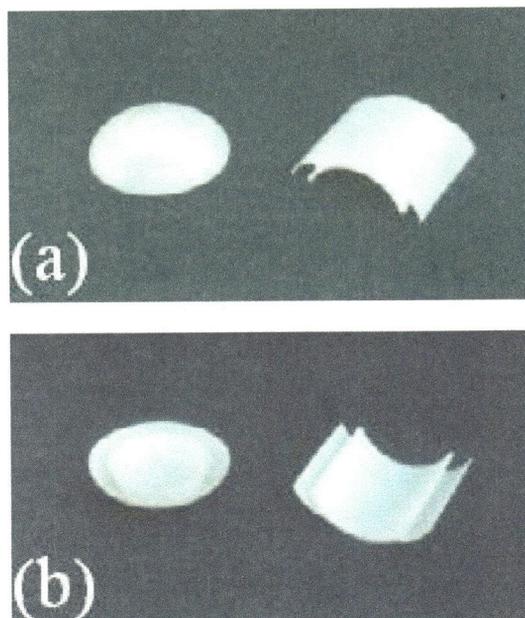
Figura 6.14 – Exemplo de um caminho gerado pelo programa para uma fatia do meio do modelo da Figura 6.9.



As peças sólidas obtidas podem ser vistas nas Figuras 6.15. O peso de cada uma das peças executadas coincidiu e foi de 60g. O custo de cada uma das peças executadas para este trabalho foi inferior aos custos de mercado (ver anexo D)

devido à finalidade da pesquisa e às melhores condições de competitividade do Núcleo de Prototipagem Rápida do ParqTec.

Figura 6.15 – Peças sólidas de revolução (esquerda) e de extrusão (direita) obtidas por FDM. (a) apoiadas na base e (b) com a base para cima.



6.2.3 – Confeção de um Molde em Borracha de Silicone e de Corpos de Prova em Resina de Poliuretano à Base de Óleo de Mamona.

Para a verificação do comportamento da geometria espacial do sólido de revolução quando submetido a impactos, foi necessária a construção de corpos de prova em resina de poliuretano à base de óleo de mamona.

Para tal objetivo foi necessária a construção de um novo molde em borracha de silicone. O sólido de revolução foi usado como matriz na construção deste molde de modo semelhante e utilizando procedimento semelhante ao que foi adotado na construção do molde da parte superior do crânio do carneiro (ver Capítulo 5). Foram usados os mesmos materiais, inclusive a caixa de madeira para a execução do molde. Alguns passos podem ser vistos nas Figuras 6.16 e 6.17 e o resultado final (molde) na Figuras 6.18.

Figura 6.16 – Fase intermediária da preparação da caixa para a confecção da parte macho do molde em silicone. Vê-se a matriz deslocada de centro e na caixa os enchimentos de isopor.

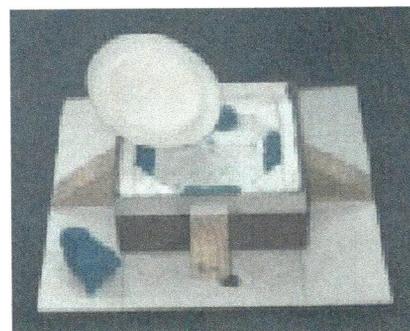
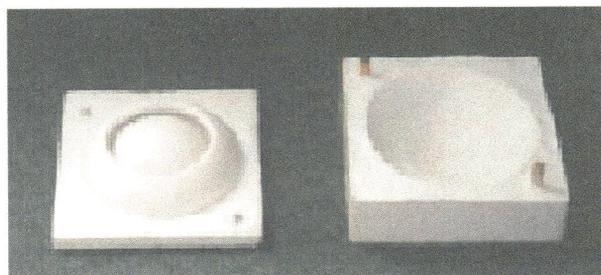


Figura 6.17 – Fase final da preparação da caixa para a confecção da parte macho do molde em silicone. Vê-se a matriz embutida no centro da caixa e o acabamento da superfície feito com massa de modelar de cor azul.



Figura 6.18 – Molde pronto. À esquerda a parte macho e à direita a parte fêmea.

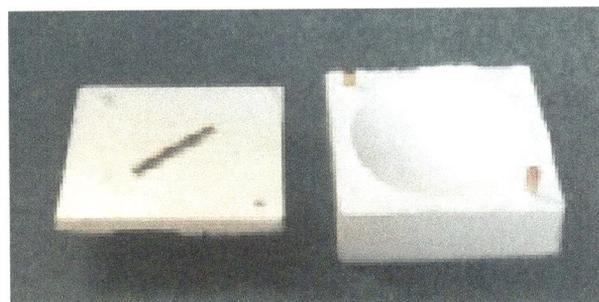


Um detalhe neste molde é que tiveram que ser executados furos na superfície da parte macho de modo a permitir a saída do ar quando do fechamento do molde, que de outra maneira ficaria preso o que resultaria em bolhas no modelo. Foram executados 8 furos com diâmetro de aproximadamente 2,0mm com o auxílio de um vazador construído artesanalmente com um pedaço de tubo de cobre com diâmetro interno de 3,0mm (Figura 6.19).

Depois de pronta a parte macho do molde ficou com massa de 400,0g e a parte fêmea com 670g. Do mesmo modo que para o molde do Capítulo 5, tentou-

se também confeccionar um postigo para execução de corpos de prova sem aba (ver adiante), mas como as paredes deste postigo ficaram muito finas e irregulares, esta tentativa não teve êxito.

Figura 6.19 – À esquerda a parte macho do molde e sobre ela o vazador de cobre apontando seu lado direito para o círculo ao longo do qual foram executados os furos para saída do ar.



Com os moldes prontos foram construídos 15 corpos de prova em resina de poliuretano à base de óleo de mamona utilizando o mesmo material e o procedimento semelhante ao descrito para a construção dos corpos de prova do crânio do carneiro (Capítulo 5). A forma deste corpos de prova é igual ao da matriz obtida por rotação de perfil mostrada na Figura 6.15

A quantidade de resina e seus componentes utilizados na confecção de cada corpo de prova pode ser vista na Tabela 6.I. Depois de pronto cada corpo de prova ficou com uma massa média de 85,0g pois havia perdas durante a moldagem.

Tipo do modelo	Massas (g)			
	Poliol	Pré-polímero	CaCO ₃	Total
Completo	43,0	61,0	31,0	135,0

Tabela 6.I – Massas de compostos da resina utilizados para confeccionar os corpos de prova do tipo D.

Destes corpos de prova em 8 deles (corpos de prova do Tipo D) foi feito apenas uma regularização da base.

Para efeito de estudo do comportamento deste sólido, buscou-se fazer uma comparação semelhante à que foi executada com os corpos de prova com geometria espacial natural (Capítulo 5), ou seja o estudo de resistência ao impacto da estrutura com e sem a parte frontal.

No caso desta geometria espacial “regular” era necessário executar a verificação, além do comportamento do corpo de prova completo, a influência da aba externa desses modelos quando submetidos a impactos

Como nestes novos corpos de prova a “parte frontal” está distribuída por toda a periferia do corpo de prova esta teve que ser cortada. Foram cortadas as abas de 7 modelos em resina completos para a construção de corpos de prova do Tipo E. Foi utilizada, conforme mostra a Figura 6.20 uma serra para metais e um arco. Para dar acabamento a esta superfície de corte, o corpo de prova foi usinado e lixado utilizando um torno, conforme mostra a Figura 6.21.

Figura 6.20 – Corpos de prova do tipo E. Corte das abas.



Desse modo foram obtidos 8 corpos de prova completos denominados do tipo D e 7 corpos de prova com a aba cortada denominados do tipo E. Estes corpos de prova foram colados ,com a utilização da própria resina de poliuretano à placas de Duratex® e no centro da parte inferior de cada placa foi feito um furo para posicionamento na base do banco de ensaios. Os corpos de prova prontos podem ser vistos na Figura 6.22.

Figura 6.21 – Corpos de prova do tipo E. Torneamento e lixamento.

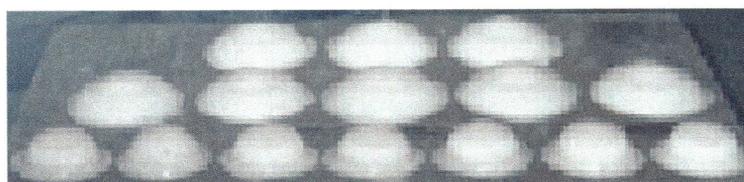


Figura 6.22 – Corpos de prova do tipo D (acima) e do Tipo E (abaixo)

6.2.4 – Ensaios de Impacto com Modelos Geométricos.

Estes corpos de prova foram testados ao impacto utilizando o mesmo banco de ensaios com a mesma massa de impacto e de modo semelhante ao que foi feito para os corpos de prova do tipo B e C. O posicionamento dos corpos de prova podem ser vistos na Figura 6.23 e os resultados dos ensaios podem ser vistos nas Tabelas 6.II e 6.III abaixo.

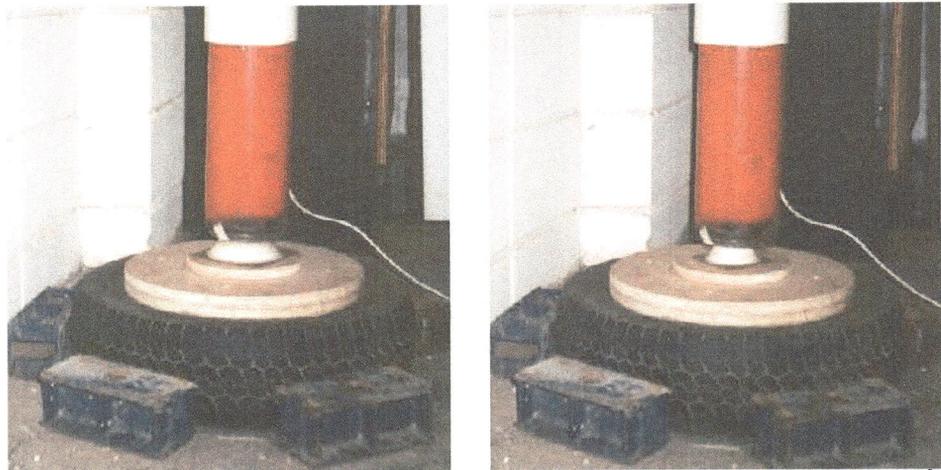


Figura 6.23 – Corpos de prova posicionados no banco de ensaios. À esquerda o Tipo D e à direita o Tipo E.

Ensaio C. P. Tipo D	Massa de impacto (Kg)	Altura de queda da massa (m)	Velocidade do impacto (m/s)	Impulso (N.s)	Energia cinética (J)	Ruptura	Tipo de Fratura
1	11,8	2,5	7,0	82,6	289,0	Não	-
2	11,8	4,0	8,9	104,5	462,6	Sim	Estilhaço
3	11,8	3,5	8,3	97,7	404,7	Sim	Estilhaço
4	11,8	3,0	7,7	90,5	346,9	Sim	Estilhaço
5	11,8	2,875	7,5	88,6	332,5	Não	-
6	11,8	2,75	7,3	86,6	318,0	Não	-
7	11,8	3,0	7,7	90,5	346,9	Não	-
1 *	11,8	3,5	8,3	97,7	404,7	Sim	Estilhaço

Tabela 6.II – Sumarização dos ensaios realizados com os corpos de prova do tipo D (modelo completo em resina da geometrização do perfil frontal do crânio do carneiro).

*- testado novamente.

Temperatura ambiente 28 graus cécius.

Ensaio C. P. Tipo E	Massa de impacto (Kg)	Altura de queda da massa (m)	Velocidade do impacto (m/s)	Impulso (N.s)	Energia cinética (J)	Ruptura	Tipo de Fratura
1	11,8	1,0	4,4	52,2	115,6	Não	-
2	11,8	2,0	6,3	73,9	231,3	Sim	Estilhaço
3	11,8	1,5	5,4	64,0	173,5	Não	-
4	11,8	1,75	5,9	69,1	202,4	Não	-
5	11,8	1,875	6,1	71,5	216,8	Não	-
6	11,8	1,94	6,2	72,8	224,3	Não	-
7	11,8	2,0	6,3	73,9	231,3	Não	-
3 *	11,8	2,25	6,6	78,4	260,2	Não	-
1 *	11,8	2,5	7,0	82,6	289,0	Sim	Estilhaço
4 *	11,8	2,375	6,8	80,5	274,6	Não	-
5 *	11,8	2,5	7,0	82,6	289,0	Não	-
6 *	11,8	3,0	7,7	90,5	346,9	Sim	Estilhaço

Tabela 6.III – Sumarização dos ensaios realizados com os corpos de prova do tipo E (modelo parcial em resina da geometrização do perfil frontal do crânio do carneiro sem a parede externa dos Sinus Frontais)

*- testado novamente.

Temperatura ambiente 28 graus célcus

O aspecto dos corpos de prova Tipo D e E que se estilhaçaram após os ensaios pode ser visto na Figura 6.24.

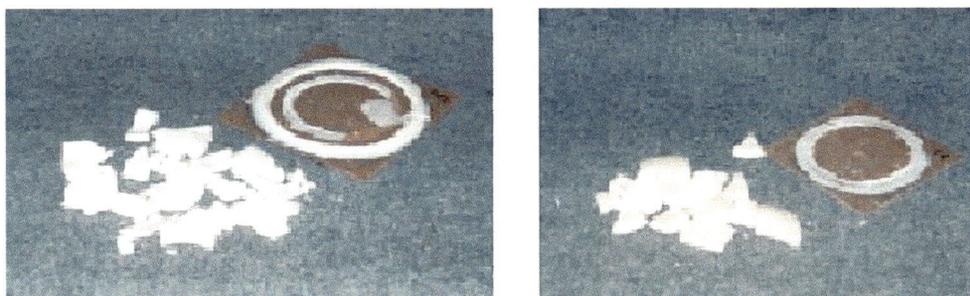


Figura 6.24 – Aspecto dos corpos de prova após ensaio de impacto. À esquerda o corpo de prova do Tipo D e à direita o corpo de prova do Tipo E.

Considerações sobre os resultados dos ensaios.

Do mesmo modo que para os corpos de prova do tipo B e C (Capítulo 5), as análises abaixo supõem que a energia de retorno (rebote) é igual para ambos os tipos de corpos de provas (D e E) testados, já que o sistema utilizado é o mesmo e a variação de massa dos corpos de prova é insignificante perto da massa do conjunto da base.

O número de corpos de prova testados não permitirão uma análise estatística do comportamento dessas geometrias à impactos. Mesmo assim, analisando as tabelas 6.II e 6.III pode-se notar que:

O corpo de prova do tipo D suportou um impulso máximo de 88,6N.s (equivalente à queda livre de uma massa de 11,8Kg de 2,875m) sem romper.

O corpo de prova do tipo E suportou um impulso máximo de 72,8N.s (equivalente à queda livre de uma massa de 11,8Kg de 1,94m) sem romper.

Em termos absolutos, nota-se que o corpo de prova do tipo D (completo) suporta 21,7% mais energia que o corpo de prova do tipo E.

Levando em conta a massa dos corpos de prova (ALMEIDA, 1999), esses números se invertem. Foi calculado o índice da energia suportada por unidade de massa e os resultados foram:

Para o corpo de prova do tipo D, com massa média de 85,0g:

$$i_D = I_D/m_D = 88,6 / 85,0 = 1,04\text{N.s/g}$$

Para o corpo de prova do tipo E, com massa média de 55,0g:

$$i_E = I_E/m_E = 72,8 / 55,0 = 1,32\text{N.s/g}$$

Dessa maneira e ao contrário do que se esperava, para um aumento da massa de 54,5% houve um aumento da resistência ao impacto de 27,0%, ou seja, a quantidade de material adicional da aba não resulta em um aumento proporcional da resistência ao impacto.

6.2.5 – Modelamento das Geometrias Regulares pelo Método dos Elementos Finitos

De modo semelhante ao que foi feito no Capítulo 5 para a geometria espacial natural, para os sólidos em estudo neste Capítulo foram executados três modelos pelo método dos elementos finitos. Dois correspondentes aos perfis geométricos modelados em resina e um correspondente a um perfil de espessura constante.

Esses modelos virtuais foram executados utilizando o mesmo programa que utiliza o método dos elementos finitos (ANSYS® 5.2 versão universitária)

Foram executados modelos utilizando três perfis diferentes denominados por: modelo D (correspondente ao corpo de prova do tipo D), modelo E (corpo de prova do tipo D) e modelo tipo E regular (Figuras 6.25 a 6.27)

Foi escolhido um mesmo tipo de elemento para confeccionar os modelos e a opção foi feita para o elemento sólido estrutural axissimétrico com 8 nós denominado PLANE83.

Este elemento é usado para o modelamento bidimensional de estruturas axisimétricas com carregamento não axisimétrico tais como flexão ou torção. O elemento tem três graus de liberdade por nó (translações nas direções nodais X, Y e Z. Este elemento é de segunda ordem com 8 nós e provê resultados acurados para malhas (triangulares e/ou quadrilaterais) geradas automaticamente e também tolera formas irregulares sem perda de acuracidade (ANSYS, 1995c).

Utilizando o elemento mencionado pode-se modelar somente o perfil do sólido de revolução, sendo que o restante da estrutura sólida simétrica com relação ao eixo de revolução é simulado.

Foi feita para os três tipos de perfis a geração automática da malha de elementos finitos e o resultado pode ser visto nas Figuras 6.25 a 6.27.

Figura 6.25 –
Modelo
axisimétrico D.
Podem ser vistos
os elementos, as
condições de
contorno (vínculos
e simetria) e o
carregamento.

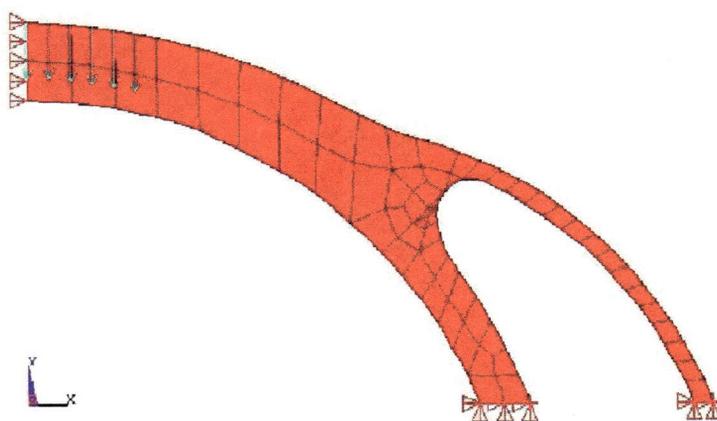


Figura 6.26 -
Modelo axisimétrico
E. Podem ser vistos
os elementos, as
condições de
contorno (vínculos e
simetria) e o
carregamento.

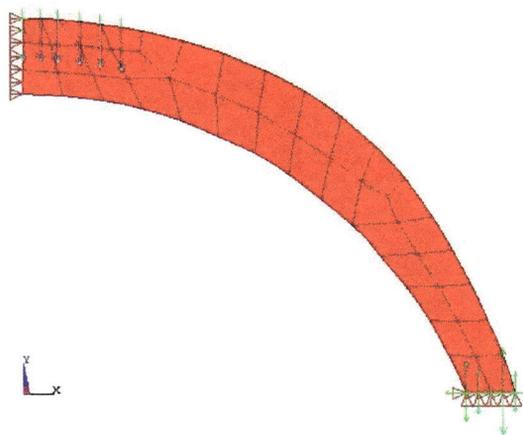
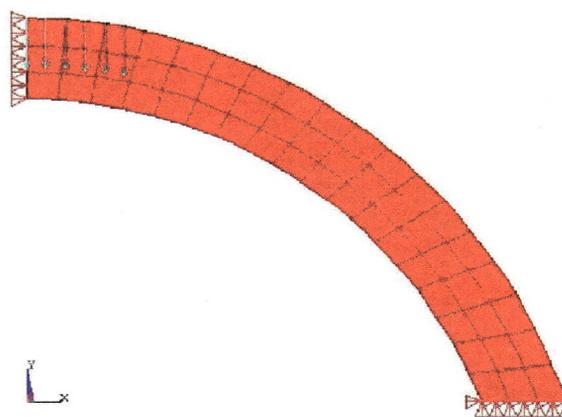


Figura 6.27 -
Modelo axisimétrico
E regular. Podem
ser vistos os
elementos, as
condições de
contorno (vínculos e
simetria) e o
carregamento.



Também é preciso citar que os modelos E e E regular foram elaborados à partir da forma e dimensões do modelo D.

As condições de contorno impostas para os três modelos foram as mesmas.

Para as propriedades do material foram usadas as da resina de poliuretano à base de óleo de mamona, ou seja, módulo de elasticidade de 1840 MPa e coeficiente de Poisson de 0,4 (CLARO NETO, 1997).

O carregamento utilizado, para possíveis futuras comparações, foi o mesmo utilizado para os modelos virtuais do crânio, ou seja, um carregamento estático total de 2500 N. Este carregamento foi dividido por seis (resultando num valor de carga de 416,66 N) e cada uma dessas cargas foi distribuída nos nós situados ao longo de 6 círculos concêntricos localizados na parte superior do modelo e com sentido contrário ao do eixo Y (Figuras 6.25 a 6.27).

Foram feitas simulações para os três modelos com o objetivo de verificar o comportamento da distribuição de tensões ao longo das estruturas.

Os resultados das tensões nas direções X, Y e Z e de von Mises para a solução nodal, bem como os deslocamentos nas direções X e Y podem ser vistos para o modelo D nas Figuras 6.28 a 6.33, para o modelo E nas Figuras 6.34 a 6.39 e para o modelo E regular nas Figuras 6.40 a 6.45.

6.2.6–Discussão dos Resultados

As tensões são predominantemente de compressão

Analisando os valores máximos das tensões de compressão e tração, verifica-se que o pior caso é o do modelo E, com concentração de tensões na região do carregamento. O melhor caso é o do modelo D ficando as tensões no modelo E regular com valores acima das do modelo D.

O destaque fica para a comparação das tensões de von Mises para os modelos. Nesta análise, novamente o modelo E apresentou o pior caso tanto em valores de tensão como na sua distribuição, sendo que o melhor caso é o do modelo D. O modelo E regular se comportou um pouco melhor que o E.

Na análise dos deslocamentos em X e em Y, o comportamento dos três modelos é parecido com desempenho um pouco melhor para o modelo E regular.

Desse modo, os dados da análise por elementos finitos dos modelos mostram que o perfil e o sólido propostos tem melhor desempenho tanto na distribuição de tensões quanto no valor absoluto dessas ao longo de sua estrutura.

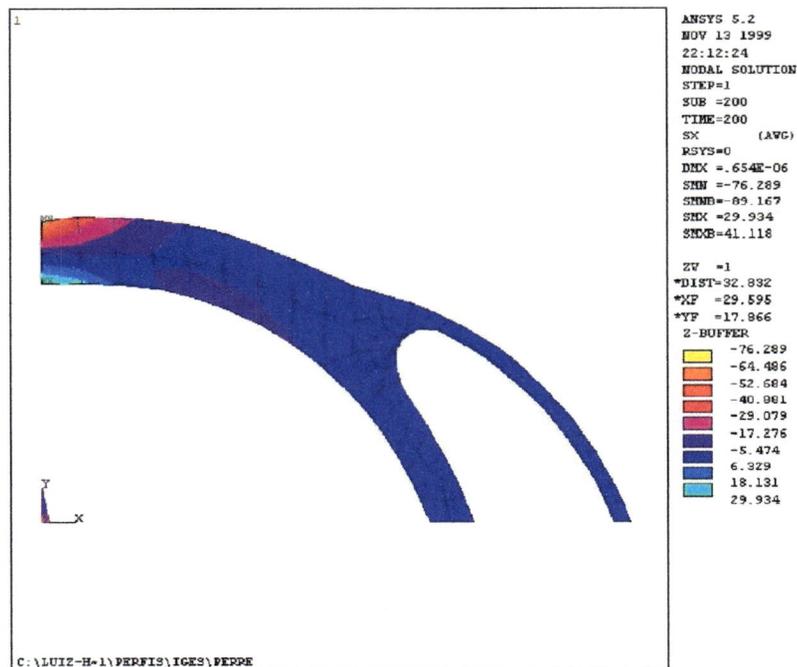


Figura 6.28 – Contorno da distribuição de tensões nodais na direção X para o modelo D. A escala indica tensões de tração (sinal positivo) e tensões de compressão (sinal negativo) em Pascal $[\text{MN}/\text{mm}^2]$.

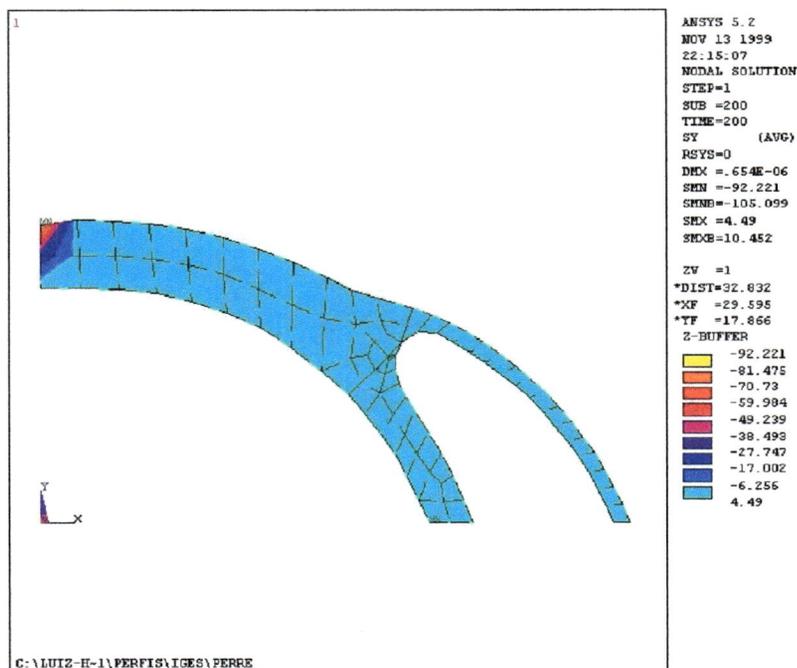


Figura 6.29 – Contorno da distribuição de tensões nodais na direção Y para o modelo D. A escala indica tensões de tração (sinal positivo) e tensões de compressão (sinal negativo) em Pascal $[\text{MN}/\text{mm}^2]$.

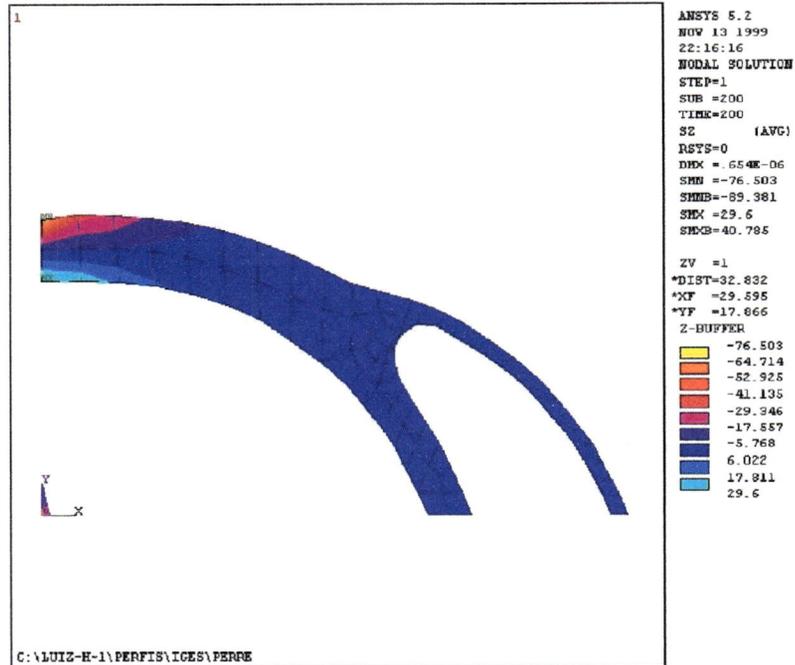


Figura 6.30 – Contorno da distribuição de tensões nodais na direção Z para o modelo D. A escala indica tensões de tração (sinal positivo) e tensões de compressão (sinal negativo) em Pascal $[\text{MN}/\text{mm}^2]$.

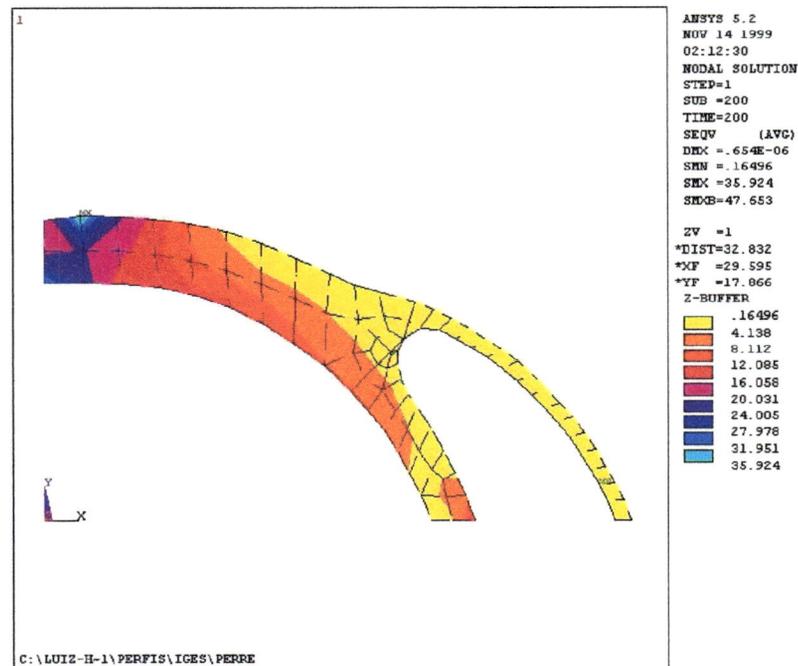


Figura 6.31 – Contorno da distribuição de tensões nodais de von Mises para o modelo D. A escala indica tensões em Pascal $[\text{MN}/\text{mm}^2]$.

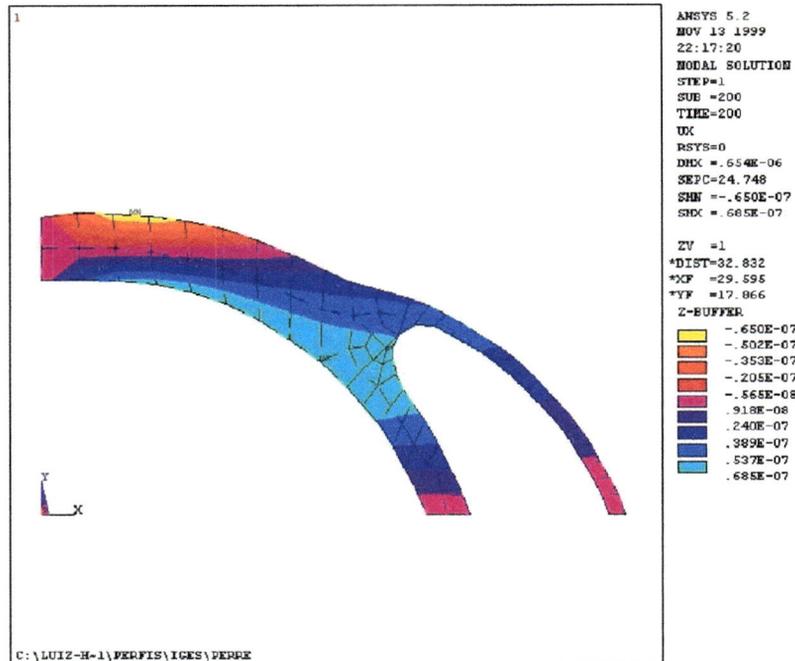


Figura 6.32 – Contorno da distribuição de deslocamentos na direção X para o modelo D. Escala de deslocamentos no sentido de X (sinal positivo) e no sentido contrário (sinal negativo) em $[10^3 \text{ m}]$.

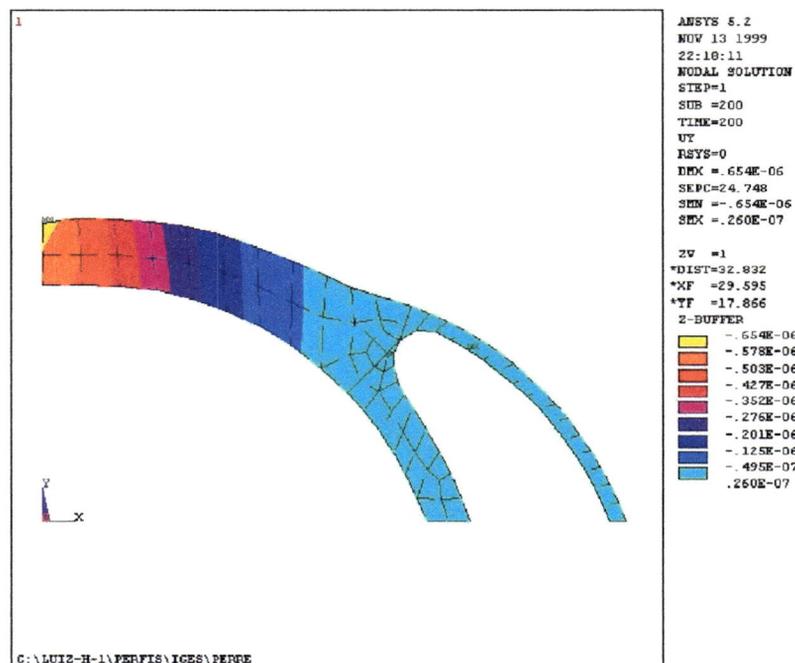


Figura 6.33 – Contorno da distribuição de deslocamentos na direção Y para o modelo D. Escala de deslocamentos no sentido de Y (sinal positivo) e no sentido contrário (sinal negativo) em $[10^3 \text{ m}]$.

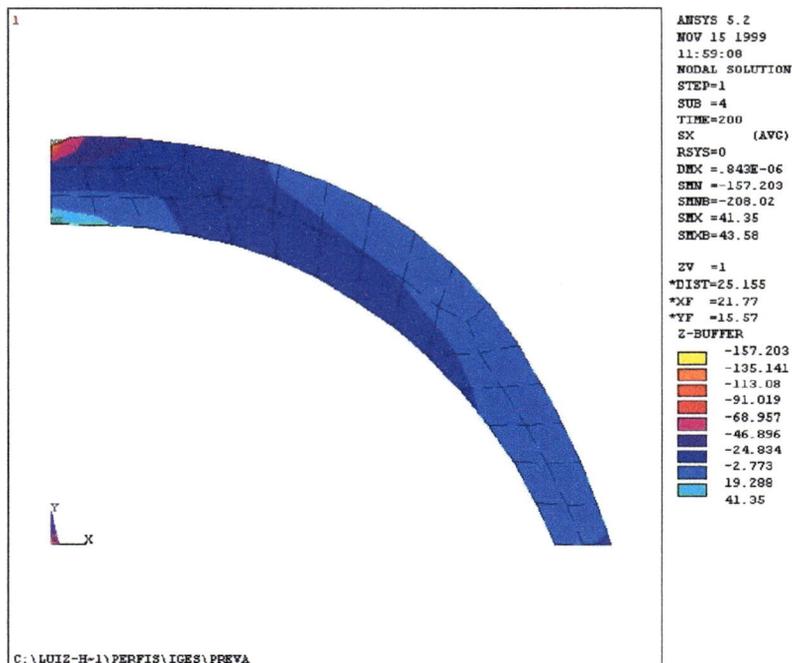


Figura 6.34 – Contorno da distribuição de tensões nodais na direção X para o modelo E. A escala indica tensões de tração (sinal positivo) e tensões de compressão (sinal negativo) em Pascal $[\text{MN}/\text{mm}^2]$.

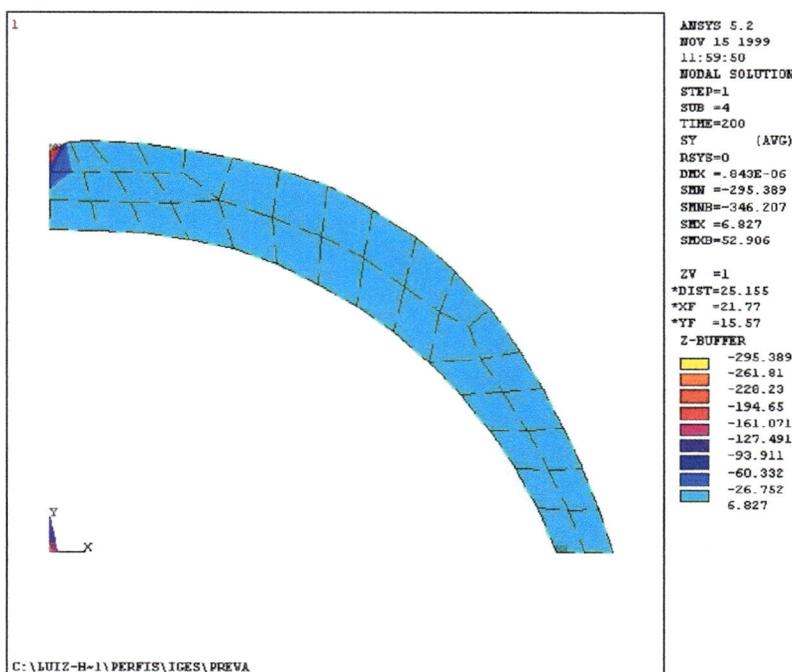


Figura 6.35 – Contorno da distribuição de tensões nodais na direção Y para o modelo E. A escala indica tensões de tração (sinal positivo) e tensões de compressão (sinal negativo) em Pascal $[\text{MN}/\text{mm}^2]$.

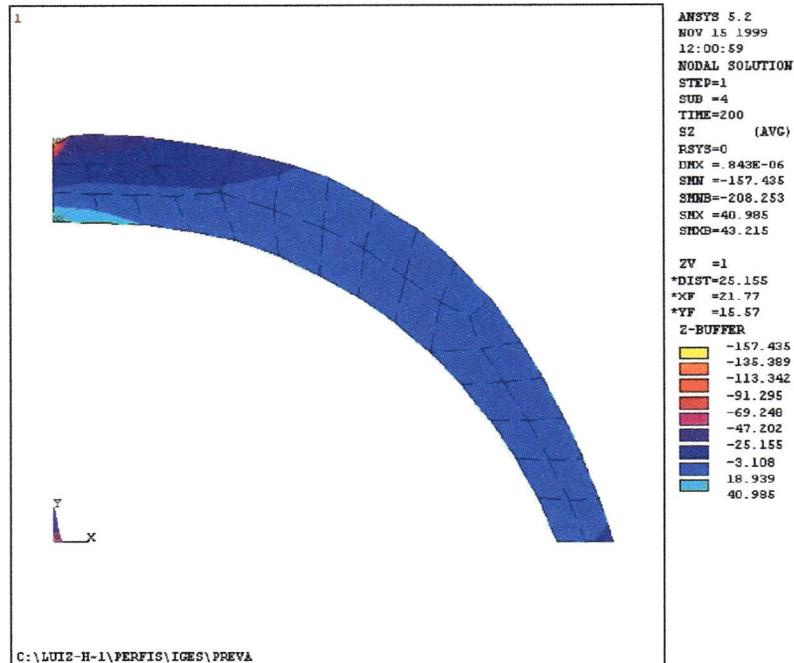


Figura 6.36 – Contorno da distribuição de tensões nodais na direção Z para o modelo E. A escala indica tensões de tração (sinal positivo) e tensões de compressão (sinal negativo) em Pascal $[\text{MN}/\text{mm}^2]$.

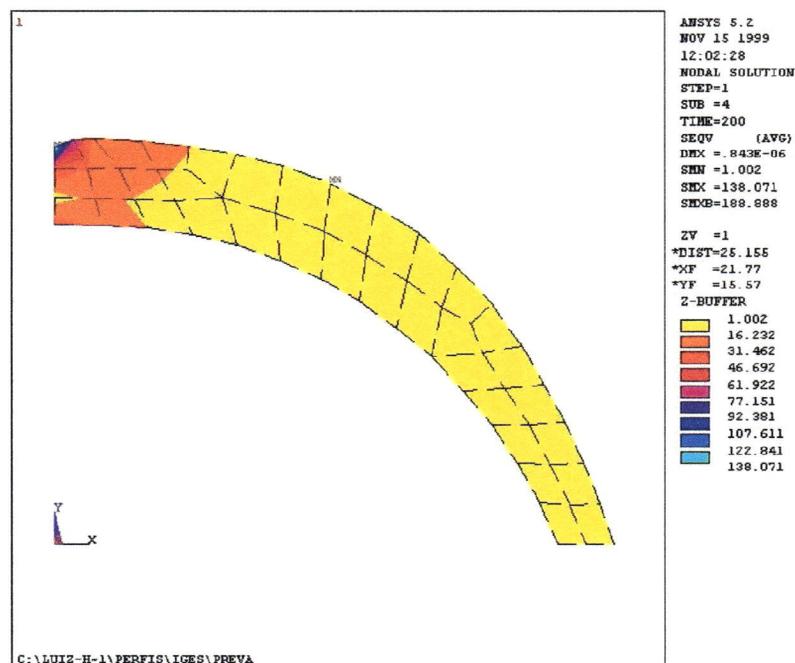


Figura 6.37 – Contorno da distribuição de tensões nodais de von Mises para o modelo E. A escala indica tensões em Pascal $[\text{MN}/\text{mm}^2]$.

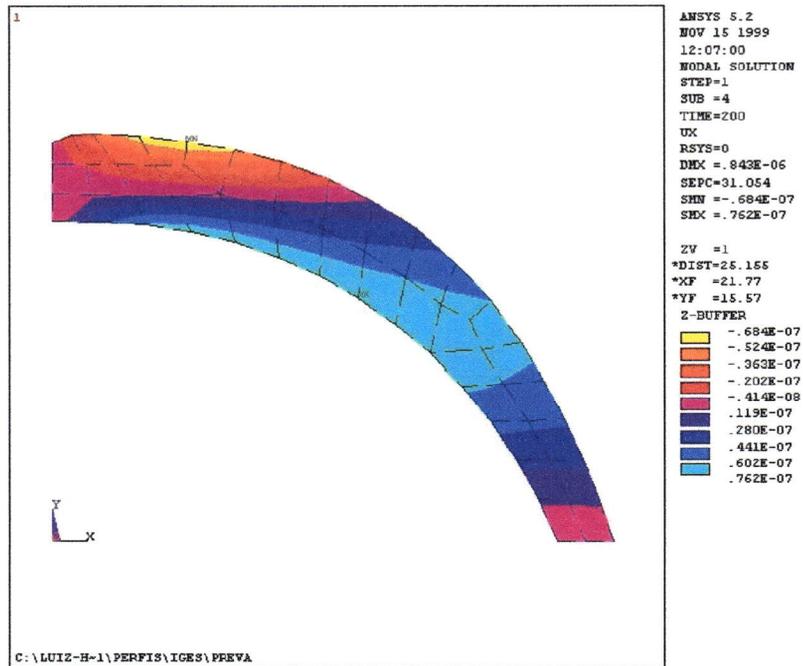


Figura 6.38 – Contorno da distribuição de deslocamentos na direção X para o modelo E. Escala de deslocamentos no sentido de X (sinal positivo) e no sentido contrário (sinal negativo) em $[10^3 \text{ m}]$.

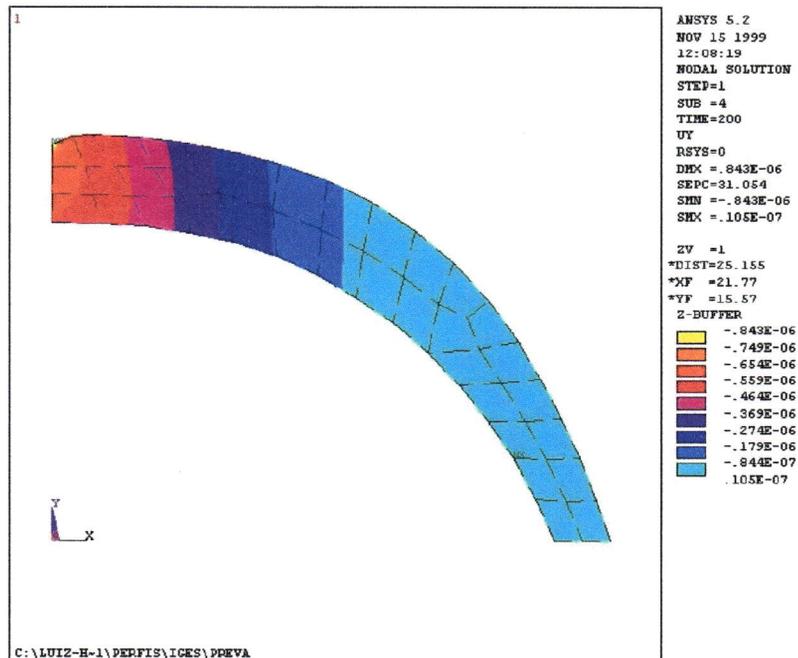


Figura 6.39 – Contorno da distribuição de deslocamentos na direção Y para o modelo E. Escala de deslocamentos no sentido de Y (sinal positivo) e no sentido contrário (sinal negativo) em $[10^3 \text{ m}]$.

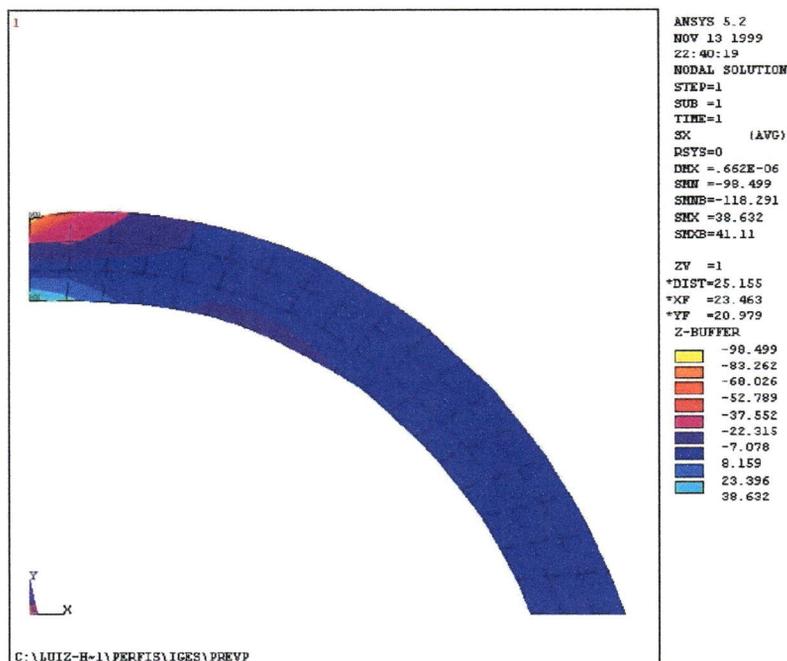


Figura 6.40 – Contorno da distribuição de tensões nodais na direção X para o modelo E regular. A escala indica tensões de tração (sinal positivo) e tensões de compressão (sinal negativo) em Pascal $[\text{MN}/\text{mm}^2]$.

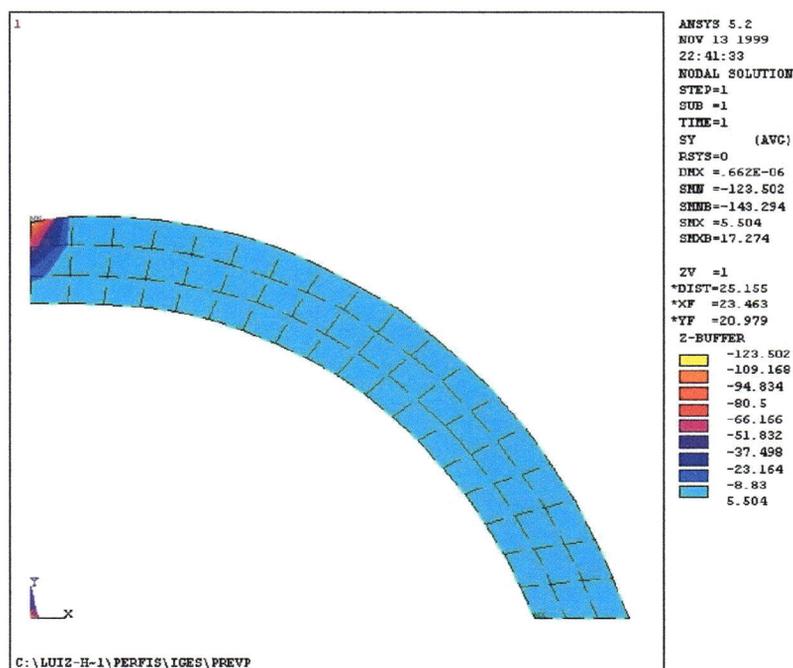


Figura 6.41 – Contorno da distribuição de tensões nodais na direção Y para o modelo E regular. A escala indica tensões de tração (sinal positivo) e tensões de compressão (sinal negativo) em Pascal $[\text{MN}/\text{mm}^2]$.

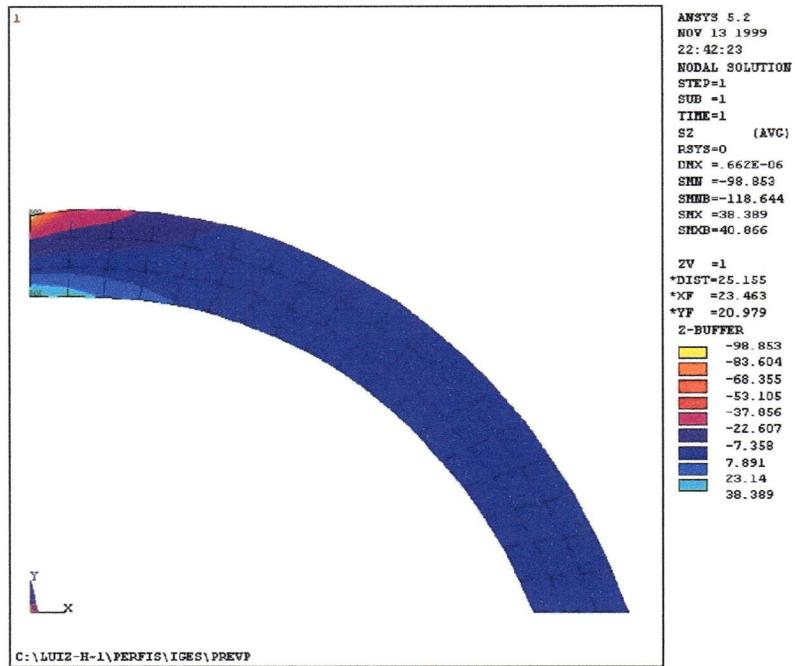


Figura 6.42 – Contorno da distribuição de tensões nodais na direção Z para o modelo E regular. A escala indica tensões de tração (sinal positivo) e tensões de compressão (sinal negativo) em Pascal $[\text{MN}/\text{mm}^2]$.

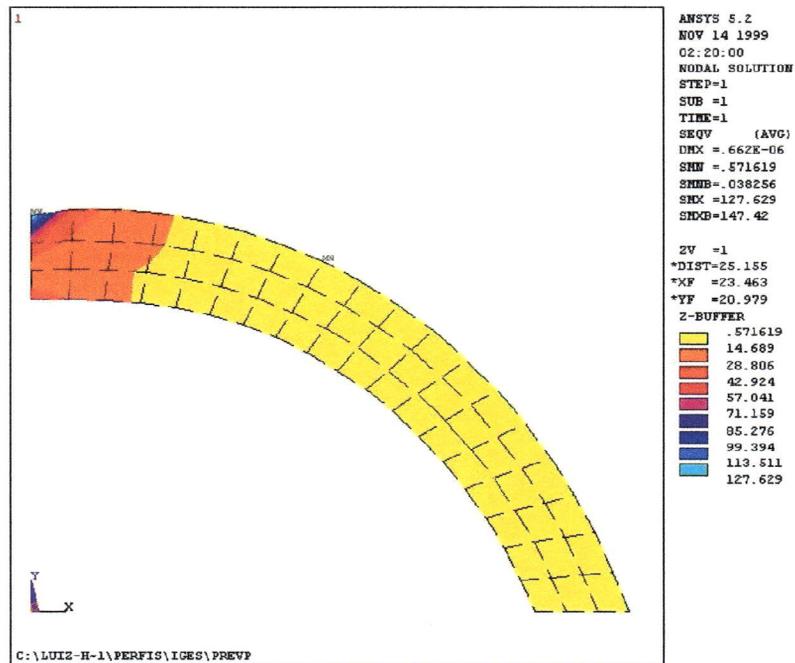


Figura 6.43 – Contorno da distribuição de tensões nodais de von Mises para o modelo E regular. A escala indica tensões em Pascal $[\text{MN}/\text{mm}^2]$.

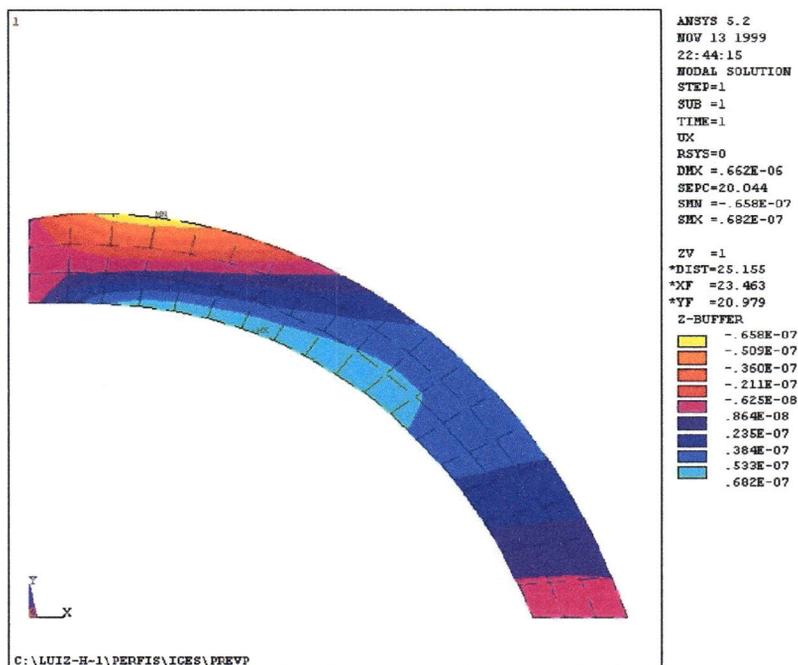


Figura 6.44 – Contorno da distribuição de deslocamentos na direção X para o modelo E regular. Escala de deslocamentos no sentido de X (sinal positivo) e no sentido contrário (sinal negativo) em $[10^3 \text{ m}]$.

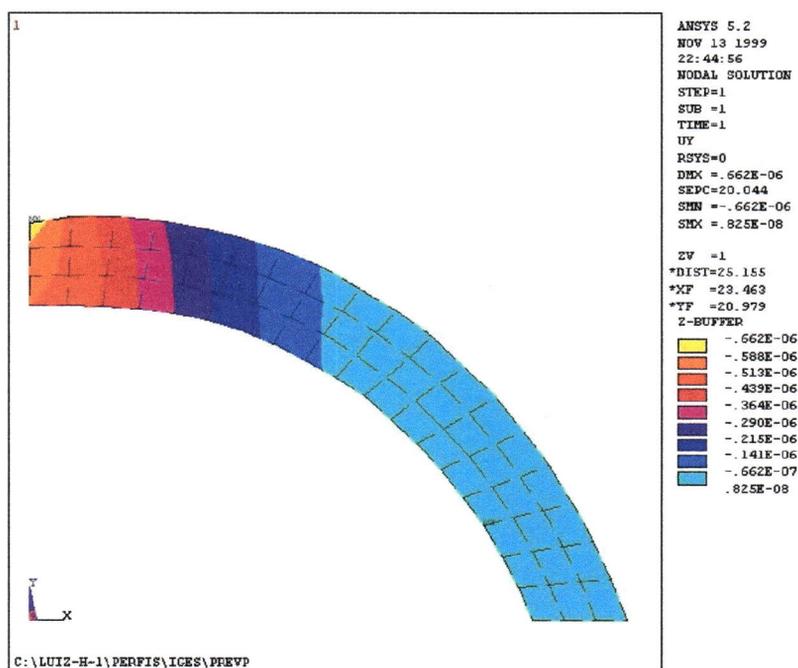


Figura 6.45 – Contorno da distribuição de deslocamentos na direção Y para o modelo E regular. Escala de deslocamentos no sentido de Y (sinal positivo) e no sentido contrário (sinal negativo) em $[10^3 \text{ m}]$.

7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

7.1 – Considerações sobre a Resistência das Geometrias Testadas ao Impacto no Banco de Ensaio.

Os principais resultados obtidos com os ensaios de impacto estão sumarizados na Tabela 7.1.

Com base nos resultados absolutos, tem-se que a resistência do sólido geométrico de revolução proposto neste trabalho se assemelha à da parte superior do crânio do carneiro, sendo ligeiramente superior.

Se for considerada a massa dos corpos de prova testados, contabilizada através de um índice de resistência por massa, a geometria espacial proposta sem as abas de reforço tem melhor desempenho.

7.2 – Considerações Sobre as Tensões que Ocorrem nos Sólidos Modelados.

Conforme era esperado, no local da aplicação da força estática, houve em todos os modelos testados uma grande concentração de tensões.

Corpo de prova	Máximo impulso suportado [N.s]	Aumento absoluto da resistência ao impacto (%)	Massa [g]	Impulso suportado por unidade de massa [N.s/g]	Aumento, com relação à massa da resistência ao impacto (%)
Tipo B	86,6	Referência	135,0	0,64	Referência
Tipo C	45,2	- 47,8	105,0	0,43	- 32,8
Tipo D	88,6	+ 2,3	85,0	1,04	+ 162,5
Tipo E	72,8	- 15,9	55,0	1,32	+ 206,3
Tipo A	73,9	- 14,7	Máxima carga estática = 12.500 N		

Tabela 7.I – Sumarização dos dados obtidos com os ensaios de impacto.

Nos modelos com a geometria espacial do crânio, as tensões analisadas por direções indicam o que já tinha sido visto durante os ensaios, ou seja, tensões relativamente elevadas ocorrem na região das suturas, sendo que nas outras regiões estas tensões são relativamente baixas.

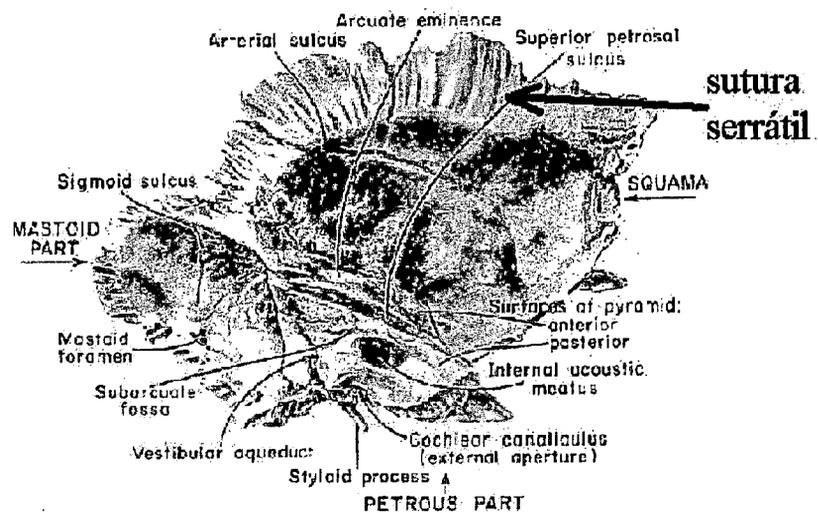
Quanto aos modelos D e E, o gráfico de deformações em X indica que ocorrem deformações de valor mais elevado logo abaixo do reforço em forma de aba, o que sugere que esta porção do sólido deva ser reforçada com mais material ou com nervuras.

7.3 – Sugestões para Trabalhos Envolvendo Uniões entre Componentes ou Partes de uma Estrutura.

O estudo dos tipos de união fixa entre os ossos dos animais (em particular a sutura serrátil) poderá contribuir para os estudos sobre sistemas de união entre as partes de uma estrutura.

Considerando o osso como um compósito, estes estudos poderão contribuir para as uniões entre materiais compósitos sintéticos. A Figura 7.1 mostra o osso temporal esquerdo humano (situado na região do ouvido), com destaque para o aspecto da superfície de união com os ossos adjacentes.

Figura 7.1 –
Osso
temporal
esquerdo
humano
(ANSON,
1967).



7.4 – Sugestões para Trabalhos Envolvendo Geometrias Espaciais que devam Resistir a Impactos.

Neste trabalho não foi feita a comparação das formas estudadas com forma geométricas espaciais mais simples, como um paralelepípedo, um tetraedro, uma semi esfera, um ovóide e outros sólidos. Sugere-se esta comparação utilizando o método dos elementos finitos

Muito embora os resultados obtidos não tenham sido desanimadores, esperava-se maior resistência das formas propostas. Em discussão com

(RUFFINO, 1999) e (ALMEIDA, 1999) foram buscadas razões para que a resistência verificada nos testes e simulações não tivesse sido aquela que se esperava. Levantou-se a hipótese de que, assim como na natureza, deveriam haver na peça em teste nervuras ligando a parte interna da aba com a parte externa da concha como mostra a Figura 7.2. Esta forma poderia ser modelada e testada para verificação da eficiência ou não desses reforços.

Figura 7.2 – Calota geométrica gerada no Capítulo 6 com nervuras no sentido radial ligando as abas com a calota interna.



7.5 – Sugestões para Aplicação de Resultados.

Os resultados de futuros aprimoramentos na forma e na disposição de estruturas resistentes ao impacto poderão ser aplicados no aprimoramento de:

- Habitáculos (célula de sobrevivência) de aviões e automóveis (Figura 7.3),

- Equipamentos de proteção individual como por exemplo coletes, capacetes e sapatos, dentre outros,
- Protetores de impacto para caminhões cujos freios perdem a ação em declives (O FREIO, 1999) (Figura 7.4),
- Estruturas para amortecer o choque de navios com o cais,
- Para-choques para veículos (Figura 7.5),
- Barras de proteção para ocupantes de automóveis,
- Confecção de placas formadas por elementos resistentes ao impacto, como a sugestão da Figura 7.6 e
- Outras aplicações que necessitem resistência ao impacto.

Figura 7.3 – Automóvel visto de cima com sugestão de aplicação da geometria proposta.

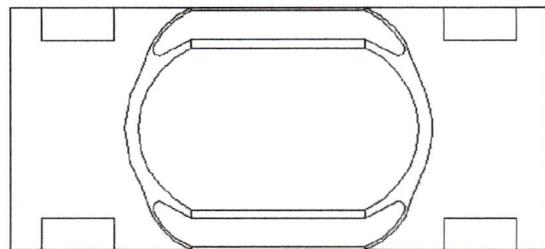


Figura 7.4 – Sistema de proteção para caminhões sem freio em um declive (O FREIO, 1999).

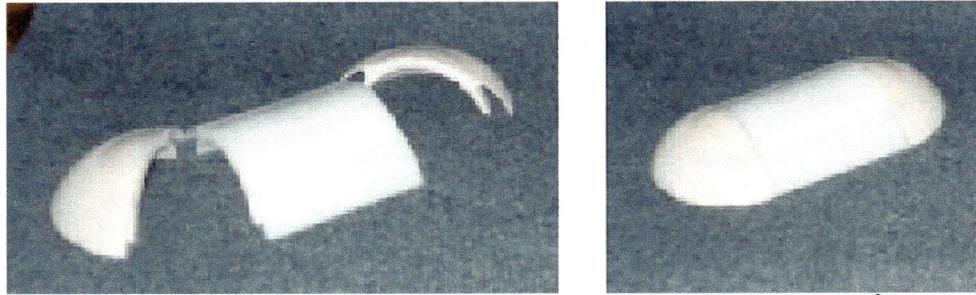
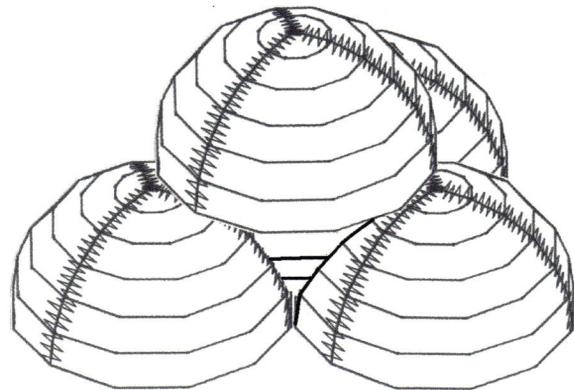


Figura 7.5 – Proposta de aplicação do perfil em para-choques. À esquerda o sólido de revolução cortado ao meio entremeadado pelo sólido de extrusão obtido por esterolitografia. À direita o conjunto justaposto.

Figura 7.6 – Proposta para montagem de um módulo dos sólidos de revolução propostos de modo a formar uma placa. Foi incorporado o princípio das suturas.



ANEXOS

ANEXO A

Método de MATTHECK para otimização de peças à fadiga.

Pesquisador do Instituto de Pesquisas de Materiais do Centro de Pesquisas de Karlsruhe (Alemanha), Mattheck vem estudando, com êxito, desde aproximadamente 1985 os princípios de resistência das árvores. Através de fotografias de estruturas particulares de árvores elaborou esquemas para uma interpretação mecânica do que ocorre com os esforços e as tensões ao longo da estrutura, conforme ilustra a Figura A1.1 (MATTHECK, 1991).

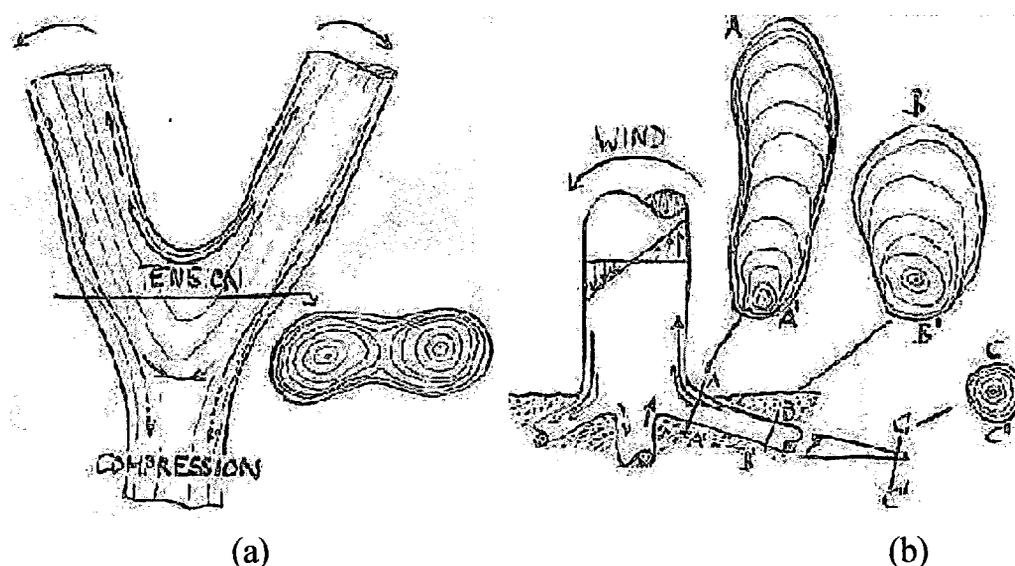


Figura A1.1 – (a) relação entre a trajetória das tensões (“fluxo da força”) e o arranjo dos anéis de crescimento nas forquilhas sob flexão. (b) Excentricidade nos anéis de crescimento nas raízes próximas ao caule (MATTHECK, 1991).

Com este trabalho, Mattheck estabelece duas regras utilizadas pela natureza nas árvores para que estas resistam às solicitações externas:

- 1 - A hipótese de tensões constantes na superfície das árvores e
- 2 - A lei da minimização de cargas externas, já que as árvores “detectam” os picos locais de tensão e aumentam seu corrente anel de crescimento exatamente onde as maiores tensões estão presentes.

Seus estudos progrediram e o conhecimento acumulado foi aplicado no desenvolvimento de um esquema de utilização do método dos elementos finitos denominado Otimização com o Auxílio do Computador (*Computer Aided Optimization – CAO*), onde com base nas regras já mencionadas o programa simula o crescimento das árvores em peças mecânicas com vistas à obter novas geometrias espaciais destas peças com distribuições de tensões mais uniformes e com isso melhorar resistência à fadiga e minimizar o peso (MATTHECK & BURKHARDT, 1990 e MATTHECK 1995).

Este esquema pode ser implementado utilizando um programa de elementos finitos comercial, seguindo os seguintes passos:

- 1 - Gerar uma estrutura pelo método dos elementos finitos da proposta inicial de projeto considerando todos os aspectos funcionais que são relevantes para a operação do componente em serviço e com uma configuração razoável para as condições do carregamento. Quanto mais pobre a construção, mais tempo computacional será necessário para otimizá-la.

- 2 - Aplicar o carregamento de serviço pretendido e as condições de contorno e executar o programa. Este primeiro cálculo fornece os deslocamentos nodais individuais, as deformações e tensões e as tensões de referência de von Mises.

- 3 - Esta malha de elementos finitos é coberta então, com uma fina e uniforme camada de elementos com um módulo de Young bem menor que o do material abaixo (em torno de 1/400 do valor inicial), pelo menos na área destinada a “crescer”. Esta camada é equivalente ao atual anel de crescimento das árvores (câmbio).

- 4 - Quando o carregamento é aplicado a estrutura abaixo da camada

superficial macia e a própria camada superficial se deformam elasticamente e no passo seguinte será permitido à camada superficial macia se dilatar volumetricamente de acordo com a lei:

$$\varepsilon_v = k (\sigma_{\text{Mises}} - \sigma_{\text{ref}})$$

onde:

ε_v é a variação volumétrica,

k é uma constante,

σ_{Mises} é a distribuição de tensões de von Mises calculadas no cálculo elástico e

σ_{ref} é a tensão de referência.

Se o usuário não tiver a opção de dilatação em seu pacote computacional de elementos finitos, esta dilatação pode ser substituída pela expansão térmica da camada superficial. Isto é obtido se tensões de von Mises forem formalmente “igualadas” com uma distribuição fictícia de temperatura:

$$\sigma_{\text{Mises}} = (T - T_{\text{ref}})$$

onde:

T é a temperatura e

T_{ref} é a temperatura de referência.

Aplicando este truque, as diferenças de unidade entre tensões e temperaturas são grosseiramente ignoradas, sendo que as áreas de altas tensões são convertidas em áreas de altas temperaturas. Atribuindo somente à camada externa um coeficiente de expansão diferente de zero, enquanto que ao material abaixo desta deverá ser atribuído um diminuto coeficiente de expansão térmica, implica que somente à camada superficial é permitido acréscimos de volume significativos.

5 - A próxima execução do programa finalmente simula o crescimento adaptativo. As tensões térmicas são consideradas enquanto as tensões mecânicas são igualadas a zero. Durante esta execução, a camada superior “cresce” de acordo com a temperatura. As áreas de maiores tensões, que se tornaram áreas de

altas temperaturas sofrem uma expansão mais pronunciada. Desde que a camada superficial é “tão mole quanto manteiga”, as colisões entre elementos adjacentes devem ser evitadas.

6 - Os deslocamentos incrementais são multiplicados pelo uso de um fator razoavelmente definido de modo a se obter correções de forma visíveis.

7 - A camada dilatada deve então ser incorporada ao restante da peça, com a readaptação de seu módulo de Young e deve ser reiniciado o processo a partir do segundo passo.

8 - Um controle da deformação elástica deve ser feito para determinar o grau de otimização com o valor alto do módulo de Young por toda a peça, ou seja, também na camada superficial que era mole antes.

Este procedimento deve parar quando as tensões no entalhes forem reduzidas completamente ou se as limitações de projeto proibirem um acréscimo em uma ou outra dimensão do projeto (MATTHECK & BURKHARDT, 1990 e MATTHECK 1995).

Aplicações deste procedimento podem ser encontradas na literatura como por exemplo as otimizações de uma viga em balanço e de uma placa com um furo (MATTHECK & MOLDENHAUER, 1990), de uma vedação de borracha para eixos (MATTHECK & ERB, 1991) e, conforme a Figura A1.2, de uma barra com um entalhe retangular (MATTHECK et al, 1992).

Os pesquisadores de Karlsruhe também desenvolveram estudos sobre o formato da unha de felinos (MATTHECK & REUSS, 1991), coeficientes de segurança em árvores (MATTHECK et al, 1993), um aprimoramento do método CAO denominado por SKO (*Soft Kill Option*) que consiste na otimização de estruturas pela simulação da mineralização adaptativa de ossos (BAUMGARTNER et al, 1992) e mais recentemente, estudos dos mecanismos internos de fratura de árvores (DIETRICH & MATTHECK, 1995) indicando uma aproximação de linhas de pesquisa com as do *Centre of Biomimetics* de *Reading* na Inglaterra.

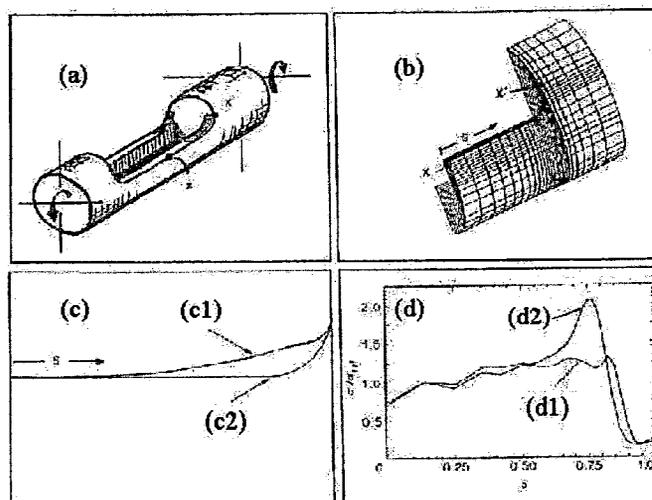


Figura A1.2 – O otimização pelo método de Karlsruhe: (a) Peça sujeita à flexão com entalhe longitudinal; (b) Malha de elementos finitos para $\frac{1}{4}$ da peça; (c) Perfil dos projetos original (c2) e otimizado (c1); (d) Perfil das tensões de von Mises para os projetos original (d2) e otimizado (d1), ao longo da coordenada “s” (MATTHECK et al, 1992).

ANEXO B

Silicone para Moldes.

Seleção de Produtos

Borrachas de Silicone da Dow Corning

São fáceis de usar
Reproduzem detalhes intrincados
Mantêm relevos acentuados
Possuem características naturais de desmoldagem

Oferecem tempo de trabalho e de cura ajustáveis
São flexíveis e reduzem problemas de desmoldagem e stress sobre as peças
Provêm boa resistência à maioria dos produtos químicos
Trabalham em ampla faixa de temperatura de operação

Produtos de cura por condensação

Borrachas de marca Dow Corning®

- * Para moldagem de estatuetas, reproduções decorativas e carimbos de tampografia
- * Possuem excelente resistência à inibição
- * Utilizam catalizadores de estanho
- * Oferecem tempos de cura variáveis à temperatura ambiente

Produtos de cura por adição

Borrachas de marca Silastic®

- * Para projetos de engenharia, protótipos e fabricação de artigos de arquitetura
- * Utilizam catalizadores de platina
- * Sua cura pode ser acelerada por calor
- * Apresentam virtualmente nenhuma contração quando curadas à temperatura ambiente
- * Oferecem melhor resistência à produtos químicos

3110

Borracha de uso geral, baixa resistência ao rasgo, média dureza, baixa viscosidade, fácil de processar, preenche detalhes ínfimos, cor branca, de-aeração sob vácuo é quase sempre dispensável.

3112

Borracha de uso geral, baixa resistência ao rasgo, alta dureza, cor branca.

E RTV

Boa resistência ao rasgo, baixa dureza, tempo de trabalho prolongado, alto alongamento, cor branca.

3120

Baixa resistência ao rasgo, alta dureza, excelente estabilidade térmica, cor vermelha.

3-8001

Borracha de alta resistência ao rasgo, cor branca e baixa dureza; aplicável na confecção de matrizes de solados.

J RTV

Boa resistência ao rasgo, alta dureza, fácil desmoldagem, não permite propagação de rasgos, cor verde.

3-8002

Borracha de cor cinza, média dureza, cura rápida e bom alongamento. Para usos gerais em fundição de resinas.

3-8003

Borracha de cor cinza, baixa dureza, cura rápida e alongamento médio. Boa opção para moldes com pouco relevo.

3-8004

Borracha de cor cinza, baixa dureza, alongamento médio, cura rápida. Excelente para matrizes de solados, boa estabilidade dimensional. Boa para fabricação de carimbos de tampografia.

3-8005

Borracha de cor areia, baixa dureza, cura rápida, boa estabilidade dimensional, aplicável na confecção de carimbos de tampografia.

T RTV

Boa resistência ao rasgo, baixa dureza, ideal para produção de protótipos, transparente.

TRABALHO E SECAGEM - Quadro comparativo - Tempos de Trabalho e Secagem

Tipos de Cura	Produto e Catalizador	Relação de mistura Base: Catalizador	Tempo de Trabalho ⁽¹⁾	Tempo de Secagem ⁽²⁾
CONDENSAÇÃO	3-8001 + Cat. HS-II	20 : 1	50 minutos	4 horas
	3-8002 + Cat. 3-3347	30 : 1	2 minutos	2 horas
	3-8003 + Cat. 3-3347	30 : 1	4 minutos	2 horas
	3-8004 + Cat. 3-8004	20 : 1	50 minutos	2 horas
	3-8005 + Cat. 3-8005	20 : 1	10 minutos	3 horas
	3110 + Cat. 1	10 : 1	2 horas	7 horas
	3110 + Cat. 4	200 : 1	5 minutos	20 minutos
	3112 + Cat. 1	10 : 1	1 hora	8 horas
	3112 + Cat. 4	200 : 1	5 minutos	20 minutos
	3120 + Cat. 1	10 : 1	1 hora	8 horas
	3120 + Cat. 4	200 : 1	5 minutos	90 minutos
	ADIÇÃO	Silastic [®] E	10 : 1	90 minutos
Silastic [®] J		10 : 1	2 horas	24 horas
Silastic [®] T		10 : 1	90 minutos	24 horas

Obs.: (1) Tempo de trabalho: tempo para a mistura catalizada atingir o dobro da viscosidade inicial; produto já não escorre.
 (2) Tempo de secagem: tempo em que a borracha secou o suficiente para ser desmoldada; produto já tem aparência de borracha.

PROPRIEDADES - Quadro comparativo - Propriedades típicas
UTILIZADO

Propriedades Típicas	3110	3112	3120	3-8001	3-8002	3-8003	3-8004	3-8005	E	J	T
Peso Específico	1.17	1.35	1.47	1.16	1.13	1.10	1.20	1.20	1.12	1.28	1.13
Catalizador Usado	Cat. 1	Cat. 1	Cat. 1	HS-II	3-3347	3-3347	3-8004	3-8005	E	J	T
Aparência - como catalizado	Branco	Branco	Verm.	Branco	Cinza	Cinza	Cinza	Areia	Branco	Verde	Incolor
Viscosidade (poise)	130	250	280	100	100	100	150	150	880	880	550
Material Curado											
Dureza (shore a)	45	60	60	17	35	20	9	10	37	57	38
Resistência a tração (PSI)	320	600	800	240	180	130	260	160	850	800	830
Elongamento (%)	230	120	120	400	360	160	250	280	360	250	350
Resistência ao Rasgo (PPI)	20	30	40	30	15	8	20	20	110	90	95
Temperatura de trabalho (C)	<- 55 a 200 -->		até 300°C		<----- 55 a 200 ----->						
Contração linear (%) (1)	NIL	NIL	NIL	NIL	NIL	NIL	NIL	NIL	0.1	0.1	0.1

OBS.: (1) Contração medida depois de 7 dias a 25 °C (temperatura ambiente)

ESCOLHA DE PRODUTOS - Quadro comparativo - Escolha do produto adequado

Variáveis de Moldagem	CONDENSAÇÃO								ADIÇÃO		
	3110	3112	3120	3-8001	3-8002	3-8003	3-8004	3-8005	E	J	T
CARACTERÍSTICAS DO ORIGINAL											
Simples, sem relevo	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Complexo, algum relevo				●			●	●	●	●	●
Complexo, relevos acentuados				●			○	○	●	○	●
Objetos verticais, de grande porte ou de difícil mobilidade				●			●	●	○	○	
COMPATIBILIDADE COM MATERIAIS DE FUNDAÇÃO											
Poliésteres	○	○	○	●	○	○	●	●	●	○	○
Poliuretanos rígidos	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	○
Poliuretanos flexíveis (espuma)	○	○	○	○	○	○			○	○	○
Epoxi	○	○	○	○	○	○			○	○	○
Metais de baixo ponto de fusão	○	○	●	○	○	○			○	○	○

OBS.: (●) recomendado (○) pode ser usado

DOW CORNING DO BRASIL LTDA.
 Rua Francisco Tramoniano, 100 - 8º andar
 CEP 05686-902 - São Paulo - SP - Brasil
 Fone: (011) 845-9300 - Fax: (011) 844-5727

DOW CORNING

Sugestões para sucesso na moldagem

DOW CORNING

Depois de escolher o produto correto e como utilizá-lo de forma apropriada, estaremos no caminho certo para a confecção de moldes de boa qualidade e flexíveis usando borrachas de silicone. As recomendações a seguir servirão para aumentar o grau de sucesso na produção de moldes:

1- DE - AERAÇÃO

De-aeração é recomendada para toda e qualquer borracha de silicone quando não se utiliza equipamentos automáticos de mistura e aplicação. Pequenas bolhas de ar que resultam da mistura manual da borracha ficam presas na mistura e, se não removidas, podem interferir na precisão da superfície a ser reproduzida. A única exceção é o material 3110 RTV que pode ser usado em várias aplicações sem a de-aeração.

Uma vez que a mistura de borracha e catalizador irá expandir durante o processo de de-aeração, é importante que se use um recipiente que tenha três a cinco vezes o volume da mistura a ser de-aerada. Quanto mais baixa a viscosidade inicial do produto, como no caso do 3110 RTV por exemplo, mais expansão irá ocorrer, muito provável até cinco vezes o volume original. Os produtos de viscosidade mais elevada, como por exemplo o J RTV, irão expandir de duas a três vezes o volume original.

A mistura pode ser fácil e rapidamente de-aerada em câmaras de vácuo comuns. Este processo importante dura somente poucos minutos. Submeta a mistura a vácuo equivalente a 29mm de Mercúrio e mantenha-o até que aconteça a expansão e o retorno da mistura ao nível original no recipiente. Para tempos aproximados para de-aeração de cada material, consulte a literatura técnica individual dos mesmos.

2. INIBIÇÃO

A cura das borrachas de silicone pode ser inibida por certos contaminantes existentes nos materiais a serem copiados ou mesmo em sua superfície. A reação de inibição será a parada ou a diminuição do processo de cura do material, resultando em pegajosidade no interior do molde (interface com o original) ou mesmo a falta de cura total no molde.

Quando em dúvida sobre a possível contaminação pelo original, recomenda-se um teste de contato. Faça a mistura de uma pequena quantidade de borracha e catalizador e aplique-a sobre uma superfície não-crítica do original. Inibição terá ocorrido caso a borracha estiver pegajosa ou sem cura após o tempo recomendado em literatura.

Cura por Adição: inibição em sistemas de cura por adição, tais como as borrachas E, J e T, pode variar de pegajosidade a completa falta de cura. Entre os materiais conhecidos por causar inibição nestes sistemas estão: argilas de moldagem contendo enxofre, borracha natural, aminas, neoprene e borrachas de silicone do Sistema por Condensação, tais como 3110, 3112, 3120 RTV. Superfícies que estiverem em contato com estas substâncias podem igualmente causar inibição. Água, quando presente na peça a ser moldada, pode causar inibição da mesma forma. As literaturas das borrachas trazem informações (listas) sobre os inibidores e não-inibidores dos sistemas de Cura por Adição.

Cura por Condensação: inibição nos sistemas de cura por condensação, como no caso do 3110, 3112, 3120 RTV, não é comum. Entretanto, algumas argilas de moldagem poderão retardar o processo de cura destes materiais quando em contato com as mesmas. Quando o original for removido, diferentemente do caso anterior, a borracha irá curar completamente (mesmo com esta inibição inicial).

Prevenção de inibição: uma prática comum na prevenção de inibição é o uso de uma "barreira de proteção" para evitar um contato direto da borracha de silicone com a superfície da peça original. Uma fina camada de verniz acrílico forma uma boa barreira de proteção na maioria dos casos. Um outro material que forma uma barreira de proteção efetiva é o Álcool Polivinílico (PVA). Uma solução aquosa de 8% de álcool PVA provê o melhor resultado com as borrachas de silicone. Esta solução pode ser aplicada por pincel ou spray. Quanto mais fina a camada, melhor a reprodução. A película de álcool precisa secar ao ar antes da moldagem. Depois que o molde estiver pronto, a película de álcool poderá ser removida do original através de imersão ou lavagem em água. A película irá dissolver-se novamente.

3. DILUENTES

Diluentes podem ser usados com qualquer borracha de silicone. O material Dow Corning® 200 Fluido serve como diluente em uma série de viscosidades, incluindo 20cs., 50cs., 100cs., e 350cs. Uma vez que diluentes podem resultar na redução das propriedades físicas, diminuir a viscosidade e seguir exudando da borracha curada, é melhor consultar a Dow Corning antes de usar diluentes.

4. AGENTES DESMOLDANTES

Para originais: um agente desmoldante deve ser usado para garantir a remoção do molde de borracha do original. Para moldagens à temperatura ambiente, uma simples solução de 5 partes de vaselina em 95 partes de solvente (VM & PNafta ou Aguarráz) pode ser usada. No caso da preparação de moldes de duas partes, vaselina pura deve ser aplicada sobre a superfície da borracha de silicone, antes de se verter a segunda metade. A borracha de silicone irá aderir sobre si mesma caso a vaselina não cubra perfeitamente a superfície.

Moldes de silicone: quando inicialmente preparados, os moldes de borracha de silicone possuem boas características naturais de desmoldagem. Com o tempo, contudo, os agentes reativos da maioria das resinas irão destruir a lubrificidade do molde, e as peças começarão a aderir ao molde. Um agente desmoldante deverá ser usado ao primeiro sinal de adesão.

Caso se use um agente desmoldante a base de silicone, este deverá ser aplicado somente na área afetada, ou seja, que apresente adesão.

5. REPARAÇÕES EM MOLDES

Usando uma escova de aço, desgaste a superfície a ser reparada. Limpe então a superfície com solvente e esteja certo de que o solvente tenha se evaporado antes de iniciar o reparo. Uma vez que as borrachas de silicone aderem perfeitamente sobre si mesmas, recomenda-se que se use a própria

borracha usada na confecção do molde na elaboração do reparo. Uma alternativa é usar o Selante Silastic® 732 RTV para reparar rasgos e pequenas avarias nos moldes.

6. DESMOLDAGEM DE PEÇAS FUNDIDAS:

Na superfície plana traseira do molde, coloque uma camada de tecido reforçador do tipo Lycra®. Deixe o molde curar, cole os quatro lados do molde nas laterais da moldura. Faça um furo de 3mm no centro do fundo do molde. Aplique, então, ar comprimido através do furo, inflando o molde e permitindo assim uma fácil remoção de peças fundidas.

7. FUNDIÇÃO POR COMPRESSÃO

Quando se utilizar borrachas de silicone em processos de moldagem por compressão, será necessário fazer furação para permitir a saída de ar. Um furo para cada 160cm² de superfície serão suficientes. O tamanho máximo deverá ser de 1,5mm.

8. ORIGINAIS DE MADEIRA

Quando se usam originais de madeira, geralmente ocorre uma microporosidade na superfície da borracha, em função da textura da madeira. Para evitar este problema, passe vaselina pastosa na superfície para fechar os poros e pincele gentilmente a borracha na superfície, no sentido da textura.

Outra situação com o uso de originais de madeira é que estes perdem detalhes a cada vez que se faz uma moldagem com os mesmos, em função de os materiais tenderem a penetrar na superfície de madeira. Para evitar esta situação, muitos usuários de originais de madeira produzem cópias de epoxy para posterior reprodução.

9. DESMOLDANTES PARA CAIXAS DE REFORÇO

Para prevenir a adesão de resinas de moldagem, especialmente poliuretanos, nas caixas de reforço dos moldes (madeira), utiliza-se geralmente um revestimento protetor chamado Dow Corning® 1890, aplicado sobre a superfície da madeira que ficará exposta ao contato com tais resinas.

10. VIDA ÚTIL DO MOLDE

Os métodos mais usados para prolongar a vida útil dos moldes são os seguintes:

a. Barreira Protetora: o uso de uma barreira protetora quando da fundição de poliuretanos pode aumentar significativamente a vida do molde, alcançando em alguns casos até 200%. Esta barreira deverá ser aplicada por spray no interior do molde antes de cada moldagem. Quando a peça fundida é retirada do molde, a barreira de proteção se transforma na camada externa da peça. Esta película poderá então ser pintada ou tratada, uma importante característica da mesma.

É importante notar que esta barreira é diferente daquela mencionada no item 2 acima.

b. Recondicionamento: isto pode ser conseguido através da aplicação do fluido Dow Corning® 200 de baixa viscosidade na superfície interna do molde. Após a aplicação do fluido, seque a superfície com um tecido seco e limpo para remover o excesso.

Cuidado: caso não se remova o excesso de fluido pode ocorrer falha no espalhamento da resina de fundição na superfície interna do molde, provocando falhas na peça fundida.

c. Cozimento: este processo é recomendado para remover endurecedores, plastificantes, e outros materiais que são liberados pelas resinas de fundição e que são gradualmente absorvidos pelos moldes de borracha de silicone.

Um cozimento lento e gradual à 93°C (200 F) por oito horas ou um rápido cozimento à 204°C (400 F) por duas horas poderão ser usados neste processo.

Precauções: sempre trabalhe em ambientes adequadamente ventilados quando estiver manuseando solventes. Além disso, todo e qualquer solvente necessita ser evaporado antes de se aplicar a borracha de silicone líquida sobre o original. Quando trabalhando com solventes, evite calor, faíscas e chama direta. Siga as instruções do fabricante de solvente, nos rótulos dos recipientes dos mesmos, incluindo as instruções sobre o manuseio seguro destes materiais.



JOÃO QUEIROZ
(019) 524-3573
524-5666

RIO CLARO

DOW CORNING

D'ALTMARE QUÍMICA LTDA. - DISTR. DOW CORNING®
Rua América Central, 190 - CEP 04755-010 - São Paulo
Tel.: (011) 522-9322 - 0800-12-9322 - Fax: (011) 522-9352

DOW CORNING DO BRASIL LTDA.

Rua Francisco Tramontano, 100 - 8º andar

CEP 05686-902 - São Paulo - SP - Brasil

Fone: (011) 845-9300 - Fax: (011) 844-5727

DOW CORNING

B:

A Escolha da

Técnica de Moldagem



TIPOS DE MOLDES:

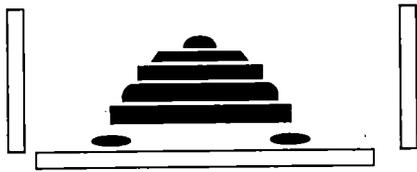
Existem três tipos básicos de moldes: moldes em bloco, moldes tipo luva, e moldes de película. O tipo mais adequado de molde para um dado original dependerá de sua forma, tamanho, grau de detalhes superficiais e mobilidade deste original. O quadro abaixo descreve estes tipos e a recomendação de seu uso, em cada caso:

Características do original		Técnica Recomendada	Vantagens
<ul style="list-style-type: none"> * Fundo plano * Detalhes simples 		Molde tipo bloco uma parte	<ul style="list-style-type: none"> * Mais fácil e rápida moldagem * Materiais de fundição podem ser vertidos no molde. * Materiais de fundição podem ser nivelados com espátulas ou com auxílio de vibração.
<ul style="list-style-type: none"> * Detalhes em todos os lados da peça * Detalhes simples 		Molde tipo bloco duas partes	<ul style="list-style-type: none"> * Molde mais durável e resistente * Molde mais fácil de manusear * Fácil para desmoldar peças * Ideal para fundir materiais que requerem resfriamento lento ou para resinas de cura rápida.
<ul style="list-style-type: none"> * Fundo plano * Detalhes complexos nos demais lados 		Molde tipo luva uma parte	<ul style="list-style-type: none"> * Fácil para desmoldar peças. * Ideal para fundição de materiais que requerem rápido resfriamento.
<ul style="list-style-type: none"> * Detalhes complexos em todos os lados 		Molde tipo luva duas partes	<ul style="list-style-type: none"> * Formas muito complexas podem ser reproduzidas * Fácil para desmoldar peças * Possibilidade de moldes com várias partes
<ul style="list-style-type: none"> * Tamanho grande * Detalhes significativamente complexos 		Molde tipo película (pincelado na superfície)	<ul style="list-style-type: none"> * Fácil de desmoldar, mesmo com originais complicados * Econômico para originais de grande porte

Moldes tipo bloco - uma parte

1. Prepare o original

2. Prepare uma caixa de madeira, plástico ou metal assegurando uma distância de 1cm entre o original e as extremidades da caixa, assim como uma distância de 1cm do ponto mais alto do original ao topo da caixa.



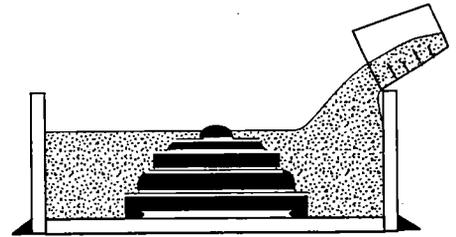
3. Fixe o original sobre a base da caixa de moldagem com massa tipo plastelina. Para uma fixação mais segura, fure a base e utilize um parafuso.



4. Monte a caixa de moldagem ao redor do original. Vede as extremidades da caixa também com massa tipo plastelina. Isto evitará o vazamento da borracha de silicone ainda na forma líquida. Se desejar produzir peças com superfície lisa e com brilho, assegure-se que o original esteja bem polido.

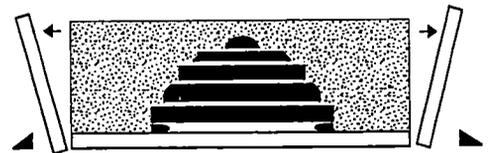


5. Prepare a borracha de silicone e verta-a sobre o original na caixa, mantendo o recipiente o mais próximo possível da caixa. Verta o silicone lentamente para permitir que o mesmo preencha todos os detalhes e se nivele. Continue vertendo até que o material atinja o nível de 1cm acima do ponto mais alto do original.

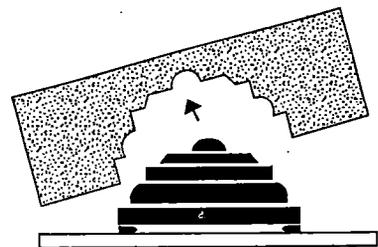


6. Deixe curar por 24 horas à temperatura ambiente.

7. Remova a selagem das laterais da caixa e desmonte-a para extrair o molde.

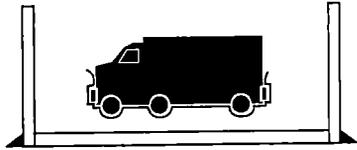


8. Separe o molde do original. O molde estará pronto para reprodução.

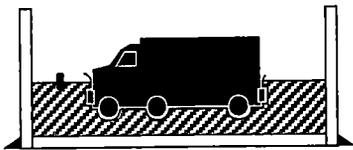


Moldes tipo bloco - duas partes

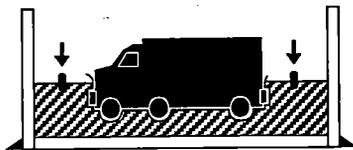
1. Prepare o original
2. Prepare uma caixa de madeira, metal ou plástico com laterais, fundo e tampa, assegurando uma distância mínima de 1cm ao redor do original.
3. Vede as extremidades da caixa com massa de modelar tipo plastelina.



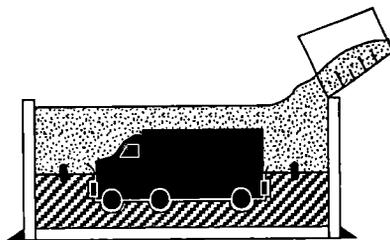
4. Envolver com folha de alumínio ou película plástica a superfície do original que estará em contato com a massa de modelar. Coloque o original na caixa, com a massa de modelar até o limite desejado de cobertura do original.



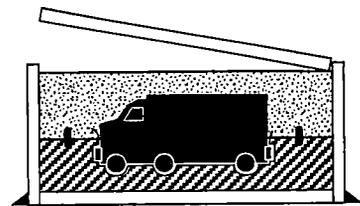
5. Coloque pinos de alinhamento na massa de modelar.



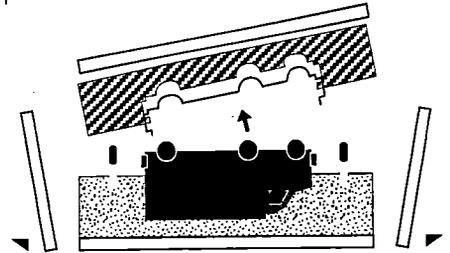
6. Prepare a borracha de silicone e verta-a sobre o original na caixa, mantendo o recipiente o mais baixo possível. Verta o silicone lentamente para permitir que o mesmo preencha todas as cavidades e se nivele. Continue a verter até que o nível do líquido atinja pelo menos 1cm acima do ponto mais alto do original.



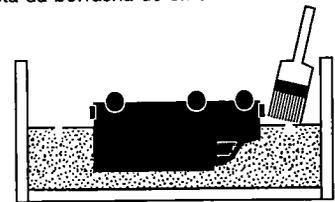
7. Deixe curar por 24 horas a temperatura ambiente.



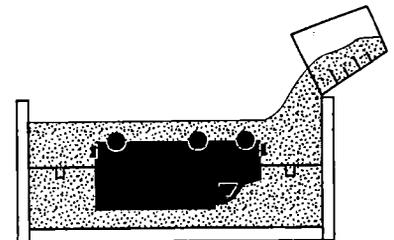
8. Inverta a caixa e desmonte-a. Remova a vedação das extremidades, a folha de alumínio ou película de plástico, assim como os pinos de alinhamento.



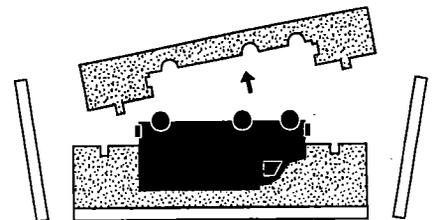
9. Monte novamente a caixa, passando um desmoldante na camada exposta da borracha de silicone.



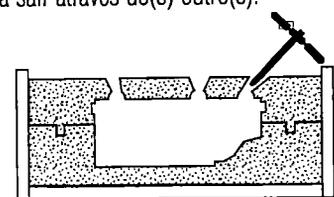
10. Mantendo o recipiente o mais próximo possível da caixa, verta a borracha de silicone. Verta lentamente para garantir que o material preencha todas as cavidades e se nivele. Continue vertendo até que o nível do líquido atinja 1cm acima do ponto mais alto do original.



11. Deixe curar por 24 horas a temperatura ambiente.
12. Desmonte a caixa e separe os dois lados do molde do original.

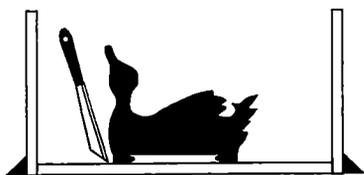


13. Para terminar a preparação do molde, faça dois ou mais furos na parede superior do mesmo. O material de fundição será vertido no molde através de um dos furos e o ar irá sair através do(s) outro(s).



Moldes tipo luva - uma parte

1. Prepare o original.
2. Prepare uma caixa de madeira, plástico ou metal, assegurando-se de que haja uma distância mínima de 1cm ao redor do original.



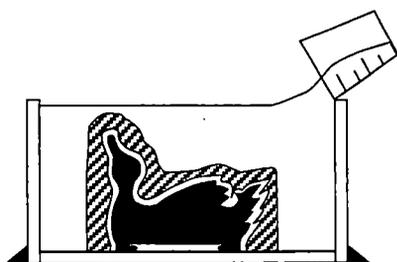
3. Coloque uma tira de massa de modelar tipo plastelina na base do original. Pressione o original firmemente sobre a superfície da caixa de moldagem. Remova todo o excesso de massa. Marque a posição do original na base da caixa.



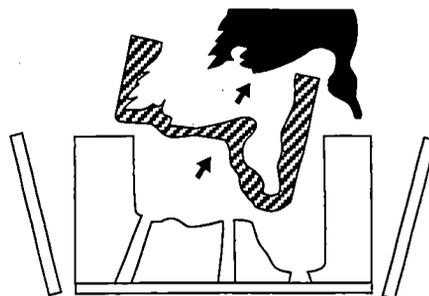
4. Cubra o original com uma folha de alumínio ou uma película plástica. Em seguida, aplique uma camada de massa de modelar tipo plastelina sobre o original coberto.



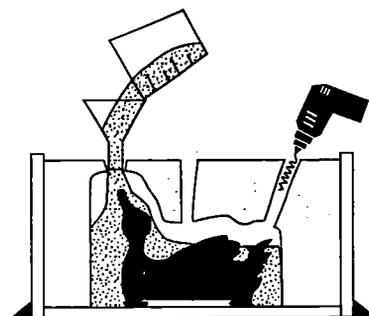
5. Monte a caixa de moldagem ao redor do original. Verta um material de suporte como gesso, poliuretano, resina, etc., dentro da caixa até preenchê-la totalmente. Deixe o material secar até que esteja totalmente endurecido. Este é o chamado molde-mãe ou matriz.



6. Desmonte a caixa. Levante a matriz e faça um furo de enchimento e vários furos de saída de ar na mesma. Remova a folha de alumínio ou a película plástica do original.

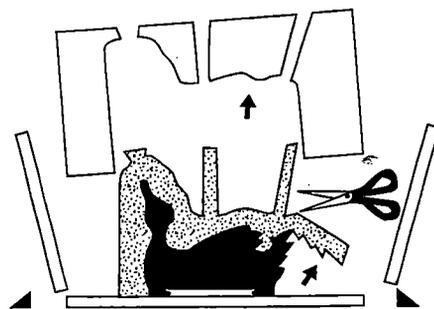


7. Coloque a matriz e a caixa de moldagem de volta na posição sobre o original. Verta a borracha de silicone lentamente através do furo de enchimento na matriz. Continue vertendo até que a borracha de silicone suba através das saídas de ar.



8. Deixe curar por 24 horas à temperatura ambiente.

9. Desmonte a caixa, remova a matriz e retire a camada de borracha de silicone da superfície do original.

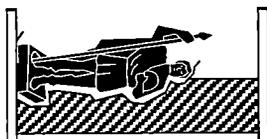


Moldes tipo luva - duas partes

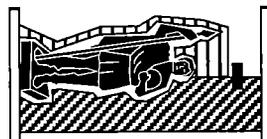
1. Prepare o original

2. Prepare uma caixa de madeira, metal ou plástico com base, laterais e tampa, assegurando uma distância mínima de 1cm ao redor do original.

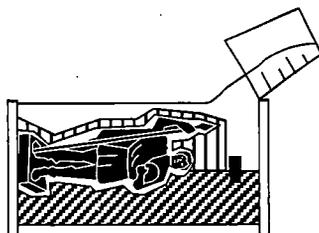
3. Envolve o original com folha de alumínio ou película plástica. Preencha a caixa com argila pré-amaciada, coloque o original no interior da caixa, até o nível previamente desejado.



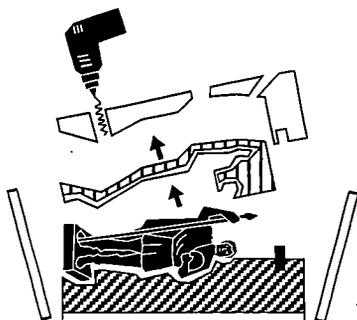
4. Cubra a parte exposta do original com uma camada de 3mm de plastelina. Coloque pinos de alinhamento na argila.



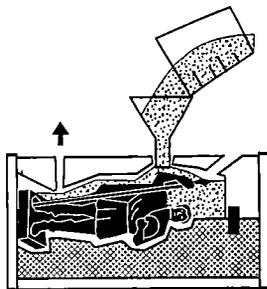
5. Despeje o material de suporte sobre o original dentro da caixa até que o mesmo esteja totalmente coberto. Espere até que o material esteja completamente endurecido.



6. Desmonte a caixa. Suspenda a matriz e faça furos de preenchimento e de saída de ar na mesma. Descarte a camada de plastelina. Retire a folha de alumínio ou a película plástica da parte exposta do original.

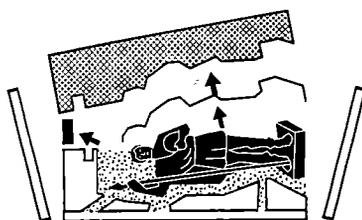


7. Recoloque a matriz na caixa na posição sobre o original. Prepare a borracha de silicone e verta-a através do furo de alimentação a da matriz. Continue vertendo até que a borracha líquida saia através dos furos de saída de ar.

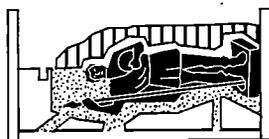


8. Deixe curar por 24 horas à temperatura ambiente.

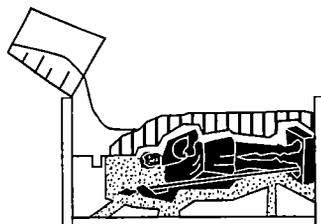
9. Inverta a posição da caixa e desmonte-a. Remova-a e descarte a camada de argila, assim como os pinos de alinhamento.



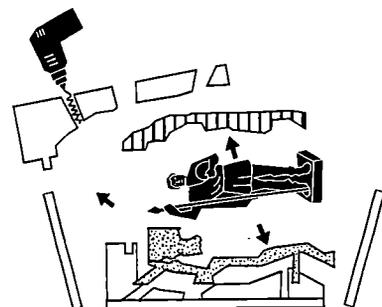
10. Monte novamente a caixa e aplique um desmoldante em seu interior. Cubra a metade visível do original com uma camada de 3mm de plastelina.



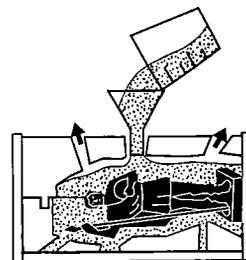
11. Verta o material de suporte sobre o original dentro da caixa, até que o mesmo esteja completamente coberto. Mantenha o molde desta forma até que o material esteja completamente endurecido.



12. Desmonte a caixa. Suspenda a matriz e faça um furo de alimentação e vários furos de saída de ar na mesma. Descarte a camada de plastelina e a folha de alumínio ou película plástica.

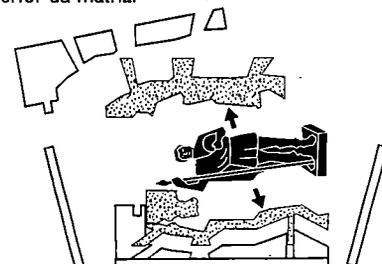


13. Coloque a matriz caixa de volta a sua posição inicial, sobre o original. Prepare a borracha de silicone e verta-a lentamente através do furo de alimentação da matriz. Continue a verter até que a borracha líquida saia através dos furos de saída de ar.

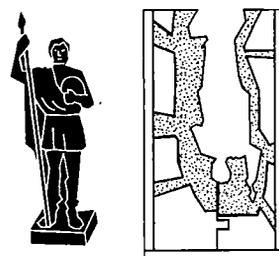


14. Deixe curar por 24 horas a temperatura ambiente.

15. Desmonte a caixa e retire o original do interior da matriz.

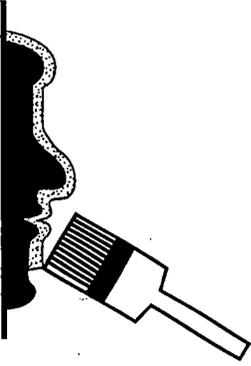


16. Para preparar a matriz para fundição de peças, faça dois ou mais furos na mesma. O material de fundição será vertido através de um deles e o ar sairá pelo(s) outro(s).

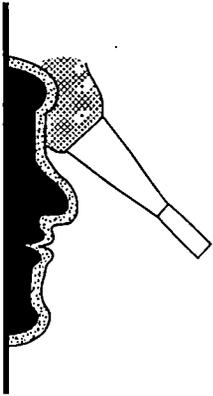


Molde tipo película - camada

1. Prepare o original.
2. Aplique no original uma fina camada da mistura de borracha de silicone e respectivo catalizador. Esta camada deverá ser aplicada por pincel e, para assegurar um revestimento sem falhas, a mistura deve ser de-aerada antes do uso. Se aparecerem bolhas de ar durante a aplicação, elimine-as com leve jato de ar ou manualmente. Deixe curar à temperatura ambiente até que a superfície esteja levemente pegajosa.



3. Prepare a mistura do material tixotrópico seguindo as instruções do fabricante/fornecedor que acompanham o produto.

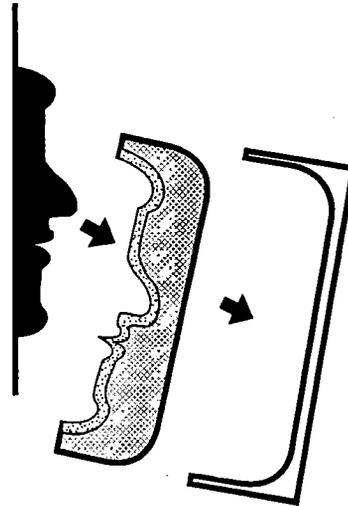


4. Utilizando um pincel ou uma espátula cubra o revestimento inicial de borracha de silicone com uma camada de material tixotrópico de 6 mm a 10 mm. Se o original for grande, aconselha-se a preparação do material tixotrópico em quantidades separadas aplicando-as a cada secção do original de cada vez.

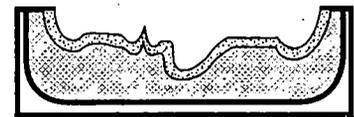
5. Deixe curar por 24 horas à temperatura ambiente. Coloque um suporte no molde de película usando um contra molde de gesso ou de espuma de poliuretano.



6. Remova cuidadosamente o contra molde e coloque-o sobre uma superfície horizontal.



7. Retire a camada de borracha da superfície do original.
8. Coloque novamente o molde de borracha de silicone no contra molde.



ANEXO C

Orçamento de Prototipagem Rápida.



Desenvolvendo produtos,garantindo o futuro.

TERMO DE ACEITAÇÃO DE PROPOSTA E CONFIRMAÇÃO DE PEDIDO.

ORÇAMENTO Nº LC99078

No caso de aceitação deste e as condições nele contidas, favor preencher este termo e nos enviar via fax para que possamos dar andamento no processo de execução dos serviços.

Por meio deste termo autorizamos a empresa ROBTEC a executar serviços conforme especificação :

Table with 4 columns: ITEM, QUANT., DESCRIÇÃO, VALOR

Summary table with rows for Subtotal, ICMS, and TOTAL C/ICMS

CLIENTE

RESPONSÁVEL:

DEPTO./RAMAL:

ASSINATURA:

CARIMBO DA EMPRESA

DATA DO ACEITE :



Desenvolvendo produtos, garantindo o futuro.

CONDIÇÕES GERAIS

O prazo de entrega baseia-se a partir do recebimento do arquivo .STL e do pedido de compra.
Sobre o custo total, deve ser considerado o acréscimo de 0,25% referente ao imposto de ISS, não incluso no custo unitário.

Entrega Das Peças : Será entregue pela ROBTEC para o cliente sem nenhum custo adicional
Cond. Pagto. : 14 dias úteis da data da emissão da Nota Fiscal
Validade Da Proposta : 7 dias

Sem mais para o momento, colocamo-nos à dispor para maiores informações e esclarecimento de quaisquer dúvidas.

Atenciosamente,


Antônio Luiz Corrêa
Alpeso Ind. E Com. De Protótipos Ltda.

Rua Cavaleiro Ernesto Gluliano, 358 - Nova Gerti - Fone/Fax: (011) 4232-9224
CEP: 09570-400 São Caetano do Sul - SP - site: www.robtec.com - e mail: info@robtec.com



Desenvolvendo produtos, garantindo o futuro.

ORÇAMENTO Nº LC99078

DATA: 16/08/99

CLIENTE: Unesp

A/C.: Sr. Luiz Carlos Felisberto

Depto.: Desenho Industrial

Fone: (0xx14) 230-2111

Fax: (0xx14) 230-4470

N. DE PÁG. COM ESTA : 02

Opções de Material: Resina Epoxi (Transparente) SLA
Poliuretano / Pu (ABS, PP, PA, PVC...)

01) Comrefor10

PERFIL ROTACIONADO. VER FIGURA 6.8

ITEM	QTDE	SLA (Preço unit.)	Prazo (dias úteis)	FDM (Preço unit.)	Prazo (dias úteis)	PU (Preço unit.)	Prazo (dias úteis)
01	01	996,00	12 à 15	996,00	12 à 15	2.631,00	15 à 20
	02	946,00	18 à 20	946,00	18 à 20	1.337,00	15 à 20
	03	916,00	23 à 25	916,00	23 à 25	906,00	15 à 20
	05					561,00	20 à 25
	10					302,00	20 à 25
	15					216,00	20 à 25
	30					298,00	20 à 25

02) Comreforextr10

PERFIL ESPELHADO E EXTRUDADO. VER FIGURA 6.9

ITEM	QTDE	SLA (Preço unit.)	Prazo (dias úteis)	FDM (Preço unit.)	Prazo (dias úteis)	PU (Preço unit.)	Prazo (dias úteis)
01	01	945,00	12 à 15	945,00	12 à 15	2.556,00	15 à 20
	02	897,00	18 à 20	897,00	18 à 20	1.300,00	15 à 20
	03	869,00	23 à 25	869,00	23 à 25	882,00	15 à 20
	05					547,00	20 à 25
	10					296,00	20 à 25
	15					212,00	20 à 25
	30					294,00	20 à 25

NO CUSTO DOS PU's JÁ ESTA INCLUSO O VALOR DO MASTER (SLA)

Rua Cavaleiro Ernesto Gullano, 358 - Nova Gerti - Fone/Fax: (011) 4232-9224

CEP: 09570-400 - São Caetano do Sul - SP - site: www.robtec.com - e mail: info@robtec.com

BIBLIOGRAFIA**BIBLIOGRAFIA CITADA.**

- AERSSSENS, Jeroen, BOONEN, Steven, LOWET, Geert and DEQUEKER, Jan (1998). Interspecies Differences in Bone Composition, Density and Quality: Potential Implications for *in Vivo* Bone Research. **Endocrinology**. v.139, n.2, p.663-70.
- ADAMS, James L. (1967). Significance of High Impact Technology on Future Space Programs. **Design for High Impact Technology - Design Engineering Conference**. New York, American Society of Mechanical Engineers – ASME, p.3-13, may.
- ANGELUCCI, Enzo (1971). **Gli Aeroplani**. Arnoldo Mondadori Editori, Milano.
- ALBIM, Flávio (editor) (1996). Búfalo – Um Animal de Mil e Uma Utilidades. **Revista Búfalo Especial – Pecuária Moderna**. São Paulo, p.4-5.
- ALMEIDA, Flávio Couto (1999). **Comunicação Pessoal**. São Carlos, EESC – USP, Departamento de Engenharia de Produção Mecânica (aluno de graduação).
- AMATO, Ivan (1991). Heeding the Call of the Wild. **Science**. s.l., v.253, p.966-68, august, 30.
- ANSON, Barry J. & DONALDSON, James A. (1967). **The Surgical Anatomy of the Temporal Bone and Ear**. Philadelphia, W.B. Saunders Co., 211p.
- ANSYS Revision 5.2 (1995a). **Procedures Manual**. Houston, Ansys Inc. (SAS IP).

- ANSYS Revision 5.2 (1995b). **Commands Manual**. Houston, Ansys Inc. (SAS IP).
- ANSYS Revision 5.2 (1995c). **Elements Manual**. Houston, Ansys Inc. (SAS IP).
- ANSYS Revision 5.2 (1995d). **Theory Manual**. Houston, Ansys Inc. (SAS IP).
- ANSYS Revision 5.2 (1996). **Expanded Ansys Workbook**. Houston, Ansys Inc. (SAS IP).
- BARNES, Sam (ed.) (1963). Organism Based Hardware. **Machine Design**, [s.l.], v.35, n.10, p.134-40, abril/1963.
- BARNES, Sam (ed.) (1967). Army Looks at Living Vehicles. **Machine Design**, [s.l.], v.39, n.12, maio, p.18-24.
- BAUMGARTNER, A., HARZHEIM, L. and MATTHECK, C. (1992). SKO (Soft Kill Option): The Biological Way to Find an Optimum Structure Topology. **International Journal of Fatigue**. s.l., v.14, n.6, p.387-93.
- BBC – British Broadcasting Corporation. (1993) **Nature by Design – episódio Equipamentos de Proteção**. (filme-vídeo). 23 min, mono, colorido.
- BIOLOGIA - Mamãe Natureza é um Gênio (1993). **SUPER Interessante**. São Paulo, ano 7, n.º 4, abril. p.60-5.
- BIOMIMETICS (1999). Grupos de discussão via correio eletrônico (*email*) sobre Biomimética e muitos outros assuntos de interesse da comunidade científica. University of Newcastle, Inglaterra. (site na internet: <http://www.mailbase.ac.uk>).
- BIONICS (1969). In: **ENCICLOPAEDIA Britannica**. v.3, Londres, William Benton Publisher, p.526-30.
- BIONICS (1980). In: **ENCICLOPAEDIA Britannica**. Londres, William Benton Publisher.
- BOMBARDELLI, 1985 apud RAMOS, 1993
- BONE. In: **ENCICLOPAEDIA Britannica**. Londres, William Benton Publisher. (1995)
- BONE. In: **ENCICLOPAEDIA Britannica**. Londres, William Benton Publisher, p.905-9. (1969)

- BONES. In: **ENCICLOPAEDIA Britannica**. Londres, William Benton Publisher, p.845-7. (1953)
- BONSIEPE, Gui (1978). **Teoria y Práctica del Diseño Industrial**. Barcelona, Editorial Gustavo Gilli, p.124-34.
- BRANDÃO, Marli (entrev.) (1989). Bio-table, um Encontro na Medida do Homem. **Design & Interiores**, São Paulo, v.2, n.12, p.94-5, janeiro-fevereiro. (adaptações de texto e fotos fornecidas pela revista italiana **Ufficiostile**).
- BROECK, Fabricio Vanden. & MUÑOS, Arsenio (1986). **Las Estructuras en la Naturaleza y en la Técnica**. Azcapotzalco - México, Universidad Autonoma Metropolitana, 64p.
- CANTWELL, W.J. & MORTON, J. (1991). The Impact Resistance of Composite Materials – A Review. **Composites**, sl, Butterworth-Heinemann Ltd., v.22, n.5, p.347-62, september.
- CARON, Jorge Oswaldo & FERRARI, Marisa (1998). **Projeto do Produto**. São Carlos, EESC – USP, 1988, 15p. (Apostila para a disciplina Desenho do Objeto I do Curso de Graduação em Arquitetura).
- CLARO NETO, Salvador (1997). **“Caracterizações Físico – Química de um Poliuretano Derivado de Óleo de Mamona Utilizado para Implantes Ósseos**. São Carlos, 127p. Tese (doutorado) – Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- COSTA E SÁ, José Ricardo Cunha da (1982). **Edros**. São Paulo, Projeto Editores Associados, 126p.
- DARIO, Paolo, SANDINI, Giulio and AEBISCHER, Patrick (eds.) (1993). **Proceedings of the NATO Advanced Workshop on Robots and Biological Systems - Robots and Biological Systems: Towards a New Bionics - Preface**. (realizado em Ciocco, Toscana, Italy, June 26-30, 1989). Springer - Verlag, Berlin, 783p.
- DAVIS, Stan & DAVIDSON, Bill (1991). **2020 Vision – Transform your Business Today to Succeed in Tomorrow’s Economy**. New York, Simon & Schuster, 223p.



- DIAS, Prof. Dr. Manoel (1997). **Comunicação Pessoal**. São Carlos, UFSCar, Departamento de Biologia.
- DIETRICH, F. & MATTHECK, C. (1995). Cracks in Sabre-shaped Trees and Branches. **Journal of Theoretical Biology**, s.l., n ° 173, p.321-27.
- DOCZI, György (1990). **O Poder dos Limites – Harmonias e Proporções na Natureza, Arte e Arquitetura**. São Paulo, Ed. Mercuryo, 149p.
- DUDUCH, Prof. Dr. Jaime (1997). **Comunicação Pessoal**. São Carlos, EESC – USP, Departamento de Engenharia Mecânica.
- FELISBERTO, Luiz Carlos (1998). Biônica. **Educação Gráfica**. Bauru, v.2, n.2, p.67-72, abril.
- FELISBERTO, Luiz Carlos (1996). Contribuição para o Estudo de uma Fresadora CNC de Pequeno Porte com Cabeçote Reversível do Tipo "P. Huré" - Resumo. **Multiciência**. ASSER - Associação de Escolas Reunidas - São Carlos, v.1, n.1, p.159.
- FELISBERTO, Luiz Carlos (1996). **Contribuição para o Estudo das Organizações Empresariais com Base em Estruturas da Natureza**. São Carlos, EESC-USP, 27p. (Trabalho apresentado como parte dos requisitos para aprovação na disciplina de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica "Relações Estratégicas Entre a Integração da Manufatura e o Desenvolvimento Tecnológico" sob a responsabilidade do Prof. Dr. Oswaldo Luis Agostinho).
- FELISBERTO, Luiz Carlos (1995). **Biônica – Plágio Sem Pagamento de Direitos Autorais**. Bauru, Unesp, 9p. (notas de aula da disciplina Projeto de Máquinas e Implementos Agrícolas do Curso de Desenho Industrial, habilitação em Projeto do Produto)
- FELISBERTO, Luiz Carlos (1994). **Contribuição para o Estudo de uma Fresadora CNC de Pequeno Porte com Cabeçote Reversível do Tipo "P. Huré"**. São Carlos, 141p. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- FENEDA, Amauri Bravo (1999). **Comunicação Pessoal**. Escola de Engenharia de São Calos, Departamento de Engenharia Mecânica.

- FLORES, Fabrício (1999). **Comunicação Pessoal**. Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Mecânica.
- GERARDIN 1968 apud RAMOS, 1993
- GETTY, Robert (1981). **Anatomia dos Animais Domésticos**. 5ª edição, Rio de Janeiro, Ed. Interamericana.
- GNT (Globo News Television) (1999). **Biotecnologia** (programa exibido em 20 de fevereiro). Depoimento de Astrônomo-Físico.
- GUIMARÃES, João Luiz (1996). Mais Ultraleve que o Ar. **SUPER Interessante**. São Paulo, ano 10, n.º 10, outubro, p.46-51.
- GUNDERSON, Stephen L. & WHITNEY, James M. (1992). Controlled Unsymmetric Ply Orientation for Improved Isotropic Properties. **Advances in Experimental Mechanics and Biomimetics**. American Society of Mechanical Engineers – ASME, Anaheim – California. v.29, p.99-109.
- GUAZZELLI FILHO, Prof. Dr. Jofre (1999). **Comunicação Pessoal**. Botucatu, IB, Unesp, Departamento de Anatomia.
- HARRIS, Ana Lucia Nogueira de Camargo (1993). **A Arquitetura das Cúpulas e Coberturas Curvas em Madeira**. São Carlos, EESC – USP, 119p. (Dissertação de Mestrado LaMEM/EESC)
- HAYWARD, Vincent (1993). Borrowing Some Ideas From Biological Manipulators to Design na Artificial One. In: **Proceedings of the NATO Advanced Workshop on Robots and Biological Systems**. Springer - Verlag, Berlin, p.139-52.
- ISTITUTO EUROPEO DI DESIGN (1997). Cartaz de Divulgação de Cursos de Pós Graduação em Design e Biônica. Milano, Itália.
- ISTITUTO EUROPEO DI DESIGN (1996). Cartaz de Divulgação de Cursos de Pós Graduação em Design e Biônica. Milano, Itália.
- ISTITUTO EUROPEO DI DESIGN (1995). Cartaz de Divulgação de Cursos de Pós Graduação em Design e Biônica. Milano, Itália.
- JACOBSEN et al, 1986 apud HAYWARD, 1993

- JERONIMIDIS, G. and ATKINS, A. G. (1995). Mechanics of Biological Materials and Structures: Nature's Lessons for the Engineer. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers -part C: Journal of Mechanical Engineering Science**. v.209, p. 221-35.
- JOHNSON, Neil E. (1967). An Analytical and Empirical Approach for Designing Components Subject to Impact Loads. **Design for High Impact Technology - Design Engineering Conference**. New York, American Society of Mechanical Engineers – ASME, p.25-36, may.
- JORGE, Prof. Dr. André M (1998). **Comunicação Pessoal**. Botucatu, FMVZ – Unesp, Departamento de Produção e Exploração Animal.
- KITCHENER, A. C.(1988).An Analysis of The Forces of Fighting of The Blackbuck (*Antilope cervicapra*) and The Bighorn Sheep (*Ovis canadensis*) and The Mechanical Design of The Horns of Bovids. **Journal of Zoology**. v. 214, p. 1-20.
- LADD, A.J.C., KINNEY, J.H., BREUNIG, T.M.(1997). Deformation and Failure in Cellular Materials. **Physical Review E**. v.55, n.3 (part B), p.3271-75, march.
- LDI/SC (1988). **Curso de Biônica**. Florianópolis, Laboratório de Desenho Industrial de Santa Catarina (LDI/SC), setembro, 6p. (notas de aula).
- LEON, Ethel (1994). Um Novo Olhar Sobre a Natureza. **Globo Ciência**. São Paulo, ano 4, n.º 39, outubro, p.24-31.
- LONBORG, James O. (1967). Current Status of Design Accomplishments for Shock Levels of 10.000g. **Design for High Impact Technology - Design Engineering Conference**. New York, American Society of Mechanical Engineers – ASME, p.14-24, may.
- MATTHECK, C. (1990). Design and Growth Rules for Biological Structures and Their Application to Engineering. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**. s.l., v. 13, n.5, p.535-550.
- MATTHECK, C. & BURKHARDT, S. (1990). A New Method of Structural Shape Optimization Based on Biological Growth. **International Journal of Fatigue**. s.l., v.12, n.3, p.185-190.

- MATTHECK, C. & MOLDENHAUER, H. (1990). Intelligent CAD-method Based on Biological Growth. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**. s.l., v. 13, n.1, p.41-51.
- MATTHECK, C. & REUSS, S. (1991). The Claw of the Tiger: An Assessment of its Mechanical Shape Optimization. **Journal of Theoretical Biology**, s.l., n° 150, p.323-28.
- MATTHECK, C. & ERB, D. (1991). Shape Optimization of a Rubber Bearing. **International Journal of Fatigue**. s.l., v.13, n.3, p.206-8.
- MATTHECK, Gerhard Claus (1991). **Trees – The Mechanical Design**. Berlin, Springer-Verlag, 121p.
- MATTHECK, C., ERB, D., BETHGE, K. and BEGEMANN, U. (1992). Three-dimensional Shape Optimization of a Bar With a Rectangular Hole. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**. s.l., v. 15, n.4, p.347-351.
- MATTHECK, C., BETHGE, K., SCHÄFER, J. (1993). Safety Factors in Trees. **Journal of Theoretical Biology**, s.l., n° 165, p.185-89.
- MATTHECK, Claus & KUBLER, H. (1995). **Wood – The Internal Optimization of Trees**. Berlin, Springer-Verlag, 129p.
- MAY, Neil D. S. (1964). **The Anatomy of the Sheep**. 2ª edição, University of Queensland Press, 369p.
- MELLO, Prof. Dr. Francisco de Assis G. (1998). **Comunicação Pessoal**. Botucatu, IB – Unesp, Departamento de Zoologia.
- MILTON, D., RUMELHART, C., HANS, D. and MEUNIER, P.J. The Effects of Density and Test Conditions on Measured Compression and Shear Strength of Cancellous Bone from the Lumbar Vertebrae of Ewes. Londres, **Medical Engineering & Physics**. v.19, n.5, p.464-74, July/1997.
- MUNARI, Bruno (1978). **A Arte Como Ofício**. São Paulo, Livraria Martins Fontes Editora.
- OFFNER, D.H. (1974). Bionics a Creative Aid to Engineering Design. **Mechanical Engineering**, [s.l.], n.96, julho, p.14-8.

- O FREIO Acaba. E o Caminhão Cai na Rede. (1999). **Galileu**. Rio de Janeiro, Ed. Globo, v.8, n.92, p.10, março.
- O'MALLEY, Chris (1999). Quando a Ciência Imita a Vida. **Galileu**. Rio de Janeiro, Ed. Globo, v.8, n.94, maio, p.59.
- O VÔO das Abelhas. **Galileu**. Rio de Janeiro, Ed. Globo, v.9, n.98, p.16, setembro/1999.
- OSSO. In: **ENCICLOPÉDIA Delta Larousse**. Rio de Janeiro, Ed. Delta, 1973. p.4991-2.
- PEARCE, Peter (1990). **Structure in Nature is a Strategy for Design**. 5ª edição, Massachusetts, The MIT Press, 245p.
- PEREIRA, Duarte B. L. P. (1997). O Verdadeiro Descobridor do Brasil. **Globo Ciência**. São Paulo, ano 6, n.º 69, p.33-4, abril.
- PERRY, C.C. & LISSNER, H.R.(1962). **The Strain Gage Primer**. 2ª edição, Nova York, McGraw-Hill Book Co., 1962, 332p.
- POPESKO, Peter (1975). **Atlas of Topographical Anatomy of the Domestic Animals - Vol. 1: Head and Neck**. Philadelphia, W. B. Saunders Co., 203p.
- PURQUÉRIO, Benedito de Moraes (1999). **Comunicação Pessoal**. São Carlos, EESC – USP, Departamento de Engenharia Mecânica.
- PRINCIPLES of Stresscoat® - Brittle Coating – Experimental Stress Analysis**. Upland – Califórnia (EUA), Stresscoat Inc., 1999. 11p.
- RAMOS, Jaime (1993). **A Biônica Aplicada ao Projeto de Produtos**. Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 56p. (Dissertação de Mestrado – Engenharia de Produção)
- RUFFINO, Prof. Titular Rosalvo Tiago (1998). **Comunicação Pessoal**. São Carlos, EESC – USP, Departamento de Engenharia Mecânica.
- RUFFINO, Prof. Titular Rosalvo Tiago (1999). **Comunicação Pessoal**. São Carlos, EESC – USP, Departamento de Engenharia Mecânica.
- SANTOS, Maria Cecília dos (coord.) (1987). Guatelli: O Construtor de Leonardo. **Design & Interiores**, São Paulo, v.1, n.1, julho, p.151-6. (suplemento encartado de: **Projeto**, São Paulo, n.100, julho/1987).

- SHIMANO, Antônio Carlos (1994). **Análise das Propriedades Geométricas e Mecânicas de Tíbia Humana: Proposta de Metodologia**. São Carlos, 254p. Tese (doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SIMON, Alexandre Tadeu (1999). Emo'99 Mostrou Evolução – Conceito Hexápode. **Máquinas e Metais**, São Paulo, v.35, n. 402, julho, 50-2.
- SIQUEIRA, Prof. Dr. Edson Ramos de (1998). **Comunicação Pessoal**. Botucatu, FMVZ – Unesp, Departamento de Produção e Exploração Animal.
- SRINIVASAN, A. V. (1996a). Smart Biological Systems as Models for Engineered Structures. **Materials Science and Engineering - C4: Biomimetic Materials, Sensors and System**. v. 4, n. 4, p.19-26.
- SRINIVASAN, A. V., HARITOS, G. K., HEDBERG, F. L. JONES, W. F. (1996b). Biomimetics: Advancing Man-made Materials Through Guidance From Nature - An Update. **Applied Mechanical Review**. v.49, n.10-part 2, p.194-200, outubro.
- SRINIVASAN, A. V., CASSENTI, B. N. (1994). Hierarchy as Principle in Structural Design. **AIAA Journal**. v.32, n° 9, p.1933-5.
- TIPLER, Paul (1994). **Física para Cientistas e Engenheiros – volume 1 Mecânica**. 3ª edição, Rio de Janeiro, Ed. Guanabara-Koogan, 311p.
- TIPLER, Paul (1978). **Física – volume 1**. Rio de Janeiro, Ed. Guanabara Dois, 514p.
- THOMPSON, D'Arcy Wentworth (1942). **On Growth and Form**. volume 2, 2ª edição (reimpressão: 1979), Cambridge, Cambridge University Pres, 1116p.
- ULLER, Marcelo (1999). **Biomimética Aplicada à Engenharia Aeronáutica**. São Carlos, 151p. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo
- UTOPIA Leguminosa de um Aristocrata, A – Mexicano Dribla Gigantes Químicas no Campo da Engenharia Genética (1998). **O Estado de São Paulo**. São Paulo, 01 fevereiro. Caderno de Economia, p. B9.

- VINCENT, Julian F. V. (1997). Stealing Ideas from Nature. **RSA Journal - Proceedings of Trueman Wood Lecture**. s.l., v.145, august/september, p.36-43.
- VINCENT, Julian F. V. (1996). Tricks of Nature. **New Scientist**. v.151, n.2943, august, p.38-40.
- VINCENT, Julian F. V. (1994). What Can Designers Learn From Nature's Materials? **Design Engineering (London)**. november, p.55-6.
- VINCI, Márcia (trad.) (1989). Prossêmica: As "Dimensões Ocultas" do Homem. **Design & Interiores**, São Paulo, v.2, n.12, p.120-22, janeiro-fevereiro. (Artigo original: Le "Dimensioni Nascoste" dell'Uomo nell'Ufficio. **Ufficiostile**, Milão, n.6-7, junho-julho/1988).
- WALKER, Thomas J. & CARLYSLE, Thelma C. (1975). Stridulatory File Teeth in Crickets: Taxonomic and Acoustic Implications (Orthoptera: Gryllidae). **International Journal of Insect Morphology & Embryology**. Londres, v. 4, n° 2, p.151-58.
- WARNER Home Video (1982). **Blade Runner**. (filme-vídeo). Direção de Ridley Scott. EUA, 1 cassete NTSC, 117min, stereo, colorido.
- WARWICK, Roger & WILLIAMS, Peter L. (1979). **Gray Anatomia**. 35ª edição, Rio de Janeiro, Ed. Guanabara-Koogan, 706p.
- WIENER, 1970 apud RAMOS, 1993
- WILSON, Brayton F. & ARCHER, Robert R. (1979). Tree Design: Some Biological Solutions to Mechanical Problems. **Bioscience**. v. 29, n. 5, p.293-8, maio.
- ZANETTI, Eng. Ricardo Luiz (1999). **Comunicação Pessoal**. São Paulo, Dinateste Indústria e Comércio Ltda.

OBRAS CONSULTADAS.

- AJOVALASIT, Augusto. **Breve Guida alla Scelta dei Metodi di Analisi Sperimentale delle Tensioni**. Palermo, Università di Palermo, 1998. 19p. (obtido pela internet).
- AKIVA, U., WAGNER, H.D. and WEINER, S.. Modelling the Three Dimensional Elastic Constants of Parallel Fibred and Lamelar Bone. **Journal fo Materials Science**. v.33, n.6, p.1497-509. (1998)
- ANDRADE, Vera M.de M. & DAMIÃO FILHO, Carlos F.. **Morfologia Vegetal**. Jaboticabal: FUNEP / FCAV / UNESP, 1989. 259p.
- BENNETT, Jim & BOTKIN, Mark. The Optimum Design. **Bioscience**. v. 33, n. 8, p.474-5, setembro/1983.
- BREBIA, Carlos Alberto, FERRANTE, Agustin Ivan. **The Finite Element Technique: An Introduction for Engineers**. Porto Alegre, Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1975. 410p.
- DESENHOS da Vida Refletem Padrão Ambiental. **O Estado de São Paulo**. São Paulo, 26 dez. 1998. p. A9.
- DOEBELIN, Ernest O. **Measurement Systems-Application and Design**. 3ª edição, New York, McGraw-Hill Book Co, 1983.
- ENCONTRADO Sinal Mais Antigo de Vida. **O Estado de São Paulo**. São Paulo, 20 jan. 1999. p. A13.
- FRANCISS, Fernando Olavo. **Hidráulica dos Meios Permeáveis – Escoamento em Meios Porosos – Segunda Parte: Métodos e Técnicas de Análise Numérica – Diferenças Finitas e Elementos Finitos**. Rio de Janeiro: Interciência; São Paulo: Ed. da USP, 1980. 169p.

- GIACAGLIA, G. E. O.. **Sobre o Tempo de Duração do Choque Entre Dois Sólidos – Alguns Casos Particulares.** São Paulo, Escola Politécnica – USP, 1991. 12p. (Relatório Técnico)
- GOLDSMITH, Werner. **Impact – The Theory and Physical Behaviour of Colliding Solids.** 1ª edição, Londres, Edward Arnold Publishers Ltd., 1960. 379p.
- GORDON, J.E.. **The New Science of Strong Materials.** Penguin Books, London, 1968.
- HART, Ivor B.. **The Mechanical Investigations of Leonardo da Vinci.** Berkeley, University of California Press, 1963. 240p.
- JACKER, Corinne. **O Homem, a Memória e a Máquina – Uma Introdução à Cibernética.** Rio de Janeiro, Cia. Editora Forense, 1970. 134p.
- JACOBSEN, S.C., IVERSEN, E.K., KNUTTI, D.F., JOHNSON, R.T., BIGGERS, K.B.. Design of the UTAH/MIT Dextrous Hand. **IEEE Conf. Robotics and Automation.** 1986.
- KESSLER, Sandra L., ADAMS, G. C., DRISCOLL, Stephen B. and IRELAND, Donald R. (editors). **Instrumented Impact Testing of Plastics and Composite Materials.** A symposium sponsored by ASTM Committee D-20 on Plastics. ASTM special; technical publication; 936, Houston, Texas March 1985 382p. (BCEESC 620.1923063 s989i)
- KOENIGSBERGER, F.. **Fundamentos do Projeto de Máquinas Ferramentas para Usinagem dos Metais – Fascículos I, II e III.** (trad.: Rosalvo Tiago Ruffino), São Carlos, EESC – USP, 1981.137p.
- LINDE, Frank & SORENSEN, Hans Christian Florian. The Effect of Different Storage on the Mechanical Properties of Bone. **Journal of Biomechanics.** v.26, n.10, p.1249-52, 1993.
- LIRANI, João. **Introdução ao Método dos Elementos Finitos.** São Carlos, EESC – USP, 1995. 153p. (Notas de aula do Curso de Pós Graduação: Elementos Finitos, 1º semestre/1995).
- MARGUERRE, Hans. Bionics – At The Crossroads of Nature and Technology. **Energy & Automation.** s.l., v. 10, n. 5, p.32-3, setembro-outubro/1988.

- MUNARI, Bruno. **Das Coisas Nascem Coisas**. São Paulo, Livraria Martins Fontes Editora, 1981, 388p.
- NATUREZA Mestre de Obras. **SUPER Interessante**. São Paulo, n.º 10, p.66-72, 1989.
- RAO, S.S. **The Finite Element Method in Engineering**. 2a. edição, Londres, Pergamon Press, 1989, 642p.
- RUFFINO, Rosalvo Tiago. **Técnicas de Projeto**. São Carlos, EESC-USP, 1991. 36p.
- SANTOS, Iacir Francisco. Insensibilização de Bupalinos por Perfuração do Osso Occipital, com Pistola Pneumática de Dardo Cativo. **Higiene Alimentar**. s.l., v. 10, n.º 44, p.29-37, julho-agosto/1996.
- SAVASSI, Walter. **Introdução ao Método dos Elementos Finitos em Análise Linear de Estruturas**. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 1996. 260p.
- SCHIEL, Frederico. **Introdução à Resistência dos Materiais**. São Paulo, Editora Harper & Row do Brasil, 1984. 395p.
- SILVA SOBRINHO, Américo Garcia da. **Tópicos em Ovinocultura**. Jaboticabal, FCAV / Unesp, 1993 179p.
- THE New Alchemy: How Science is Molding Molecules into Miracle Materials. **Business Week**. July, 29, p.40-7, 1991.
- TODD, D.J. Mobile Robots - The Lessons from Nature. In: **Proceedings of the NATO Advanced Workshop on Robots and Biological Systems**. Springer - Verlag, Berlin, 1993. p.193-206.
- UNIVERSIDADE de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. Serviço de Biblioteca. **Diretrizes para Apresentação de Dissertações e Teses na EESC-USP / Universidade de São Paulo**. Escola de Engenharia de São Carlos. Serviço de Biblioteca, 2ª edição, revista e ampliada. São Carlos, 1996. 58p.
- WILSON, J.F., LI, D., CHEN, Z. and GEORGE, R.T..Flexible Robot Manipulators and Grippers: Relatives of Elephant Trunks and Squid Tentacles. In: **Proceedings of the NATO Advanced Workshop on**

Robots and Biological Systems. Springer - Verlag, Berlin, 1993. p.475-94

EMPRESAS CITADAS.

FLAG Tecnologia – Grupo Metagal. Av. Robert Gordon, 342 – Diadema – SP.

Fone (011) 445 6737, Home Page: www.regra.com.br/flag, Produtos: Engenharia Reversa (Digitalização à Laser), CAD/CAM, Prototipagem Rápida SLS e Vaccum Casting.

MEC-Q. R. Francisco Bonilha, 19. Fone: (011) 412 9211 – Santo André –SP.

PROCAM. Rua Xingu, q2. Fone: (014) 223 4452 – Bauru –SP.

SULAMERICANA. Fone: (011) 522 7755 – São Paulo -SP.